

**ADRIANO SANTOS
ALBERTO LUIZ LODI
ROMEU APARECIDO DE MORAES JÚNIOR**

**SISTEMA DE MONITORAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA
DAS SUBESTAÇÕES PRIMÁRIAS E SUBESTAÇÕES
RETIFICADORAS DO METRÔ DE SÃO PAULO**

**São Paulo
2010**

**ADRIANO SANTOS
ALBERTO LUIZ LODI
ROMEU APARECIDO DE MORAES JÚNIOR**

**SISTEMA DE MONITORAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA
DAS SUBESTAÇÕES PRIMÁRIAS E SUBESTAÇÕES
RETIFICADORAS DO METRÔ DE SÃO PAULO**

Trabalho de conclusão do curso apresentado à disciplina de Tecnologia Metroferroviária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como requisito parcial para obtenção do título de especialista.

Área de Concentração:
Engenharia Elétrica

Orientador: Prof.-Dr. Ivan Eduardo Chabu

**São Paulo
2010**

ESP/TMF

2010

M791s

DEDALUS - Acervo - EPEL



31500019665

FICHA CATALOGRÁFICA

M2010F

Moraes Júnior, Romeu Aparecido de
Sistema de monitoração do consumo de energia das
subestações primárias e subestações retificadoras do Metrô de
São Paulo/ R.A. de Moraes Júnior, A.O. dos Santos, A.L. Lodi –
São Paulo, 2010.
p. 75

Monografia (Especialização em Tecnologia Metro-Ferro-
viária). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
Programa de Educação Continuada em Engenharia.

1 Engenharia Elétrica 2 Demanda Energética I. Santos,
Adriano dos II. Lodi, Alberto Luiz III. Universidade de São Paulo.
Escola Politécnica. Programa de Educação Continuada de
Engenharia IV. t.

2127012

AGRADECIMENTOS

A nosso orientador, Prof.-Dr. Ivan Eduardo Chabu, pelo crédito, compreensão e atenção que nos foi dada.

Aos amigos Rubens Bullara, Avivaldi Ferraioli, Marcos Vicentini, Vagner Sanches, Fernando Clímaco e todos que colaboraram direta ou indiretamente para que este trabalho fosse realizado.

A nossos familiares pela paciência e compreensão.

**São Paulo
2010**

"Não te irrites, por mais que te fizerem...
Estuda, a frio, o coração alheio.
Farás, assim, do mal que eles te querem,
Teu mais amável e sutil recreio..."

(Mário Quintana)

RESUMO

Diante da tendência mundial de gestão de custos em razão da pressão por produtividade e redução do desperdício e da urgência em combater as causas do desequilíbrio ambiental, torna-se necessário buscar inovações que tragam soluções rápidas e eficazes para enfrentar esses problemas. Assim, este trabalho apresenta um projeto barato que visa aperfeiçoar a eficiência energética na malha metroferroviária da Companhia do Metropolitano de São Paulo, um transporte de massa sabidamente eficiente que utiliza energia renovável. O estudo, dividido em três partes, propõe primeiramente a implantação de um sistema computacional baseado em software livre que tem a função de disponibilizar, em tempo real, as informações do consumo de energia das subestações primárias do Metrô. A segunda parte trata da implantação de um sistema de supervisão do consumo de energia para evitar a ultrapassagem de demanda contratada nas mesmas subestações primárias, o que evitaria a penalização com tarifa mais alta e multas. A última parte consiste no estudo para a substituição dos medidores eletromecânicos por medidores eletrônicos nas subestações retificadoras do Metrô, com um exemplo realizado com monitoramento em campo.

Palavras-chave: Monitoração de energia elétrica. Demanda de energia. Consumo de energia. Subestações retificadoras. Subestações primárias.

ABSTRACT

Before the world tendency of cost management because of the pressure for productivity and waste reduction and of the urgency in fighting the environmental imbalance causes, it is necessary to look for innovations that can bring fast and effective solutions to face those problems. So, this work presents a cheap project that seeks to optimize the energy efficiency in the subway system of the Companhia do Metropolitano de São Paulo, a mass transport knowingly efficient that uses renewable energy. This work is divided into three distinct parts. The first consists in the implementation of a computational system based on free software that has the function to make available, in real-time, information from the energy consumption of the Metro primary substations. The second part is about the implementation of a monitoring system power consumption to avoid exceeding the contracted demand of Metro Primary Substations. The last part of this study for the replacement of electromechanical meters by electronic meters in the subway system rectifying substations, with an example using field monitoring.

Keywords: Monitoring of electrical energy, energy demand, energy consumption, rectifying substations, substations primaries.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Modelo de neurônio biológico	28
Figura 2 – Rede neural com a topologia (2-4-4-1).....	29
Figura 3 – Modelo de neurônio artificial.....	30
Figura 4 – Distribuição das Subestações Primárias do Metrô	34
Figura 5 – Diagrama dos setores da Linha1 – Azul.....	36
Figura 6 – Diagrama bloco de uma subestação primária do Metrô	37
Figura 7 – Fluxo dos dados desde o medidor até o SCC	39
Figura 8 – Fluxo dos dados de controle da demanda.....	41
Figura 9 – Exemplo de ultrapassagem da demanda	43
Figura 10 – Esquema típico de uma subestação retificadora	45
Figura 11 – Medidor eletromecânico	47
Figura 12 – Medidor eletrônico	47
Figura 13 – Fluxograma básico da monitoração de demanda de energia	48
Figura 14 – Fluxograma básico da monitoração de ultrapassagem de demanda de energia.....	49
Figura 15 – Arquitetura do sistema de monitoração	51
Figura 16 – Programa Captura_TOT	52
Figura 17 – Tela de consumo de energia do Scilab.....	53
Figura 18 – Topologia da rede.....	55
Figura 19 – Treinamento da rede neural	58
Figura 20 – Geração de alarme de ultrapassagem da demanda contratada + 5%... 59	
Figura 21 – Resultado gráfico da rede neural.....	60
Figura 22 – Subestação retificadora de Sacomã	61
Figura 23 – Medição manual	62
Figura 24 – Monitoração do medidor eletrônico via Ethernet	62
Figura 25 – Sistema de gerenciamento de energia	64
Figura 26 – Demanda versus horário	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Formato do sinal "RDTD total"	40
Tabela 2 – Formato da mensagem "RDTD parcial"	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIP	Alto de Ipiranga
ANR	Estação Ana Rosa
ARV	Estação Praça da Árvore
BEL	Estação Belém
BFU	Estação Barra Funda
BGD	Estação Brigadeiro
BRE	Estação Bresser
BTO	Estação São Bento
CAR	Estação Carrão
CDU	Estação Carandiru
CEC	Estação Santa Cecília
CKB	Estação Chácara Klabin
CLI	Estação Clínicas
CNS	Estação Consolação
CON	Estação Conceição
CRC	Cyclic Redundance Check
CSMA/CD	Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection
DNP	Distributed Network Protocol
GBU	Estação Anhangabaú
HDLC	High Level Data Link Control
Hz	Hertz
IED	Intelligent Electronic Device
IEE	Institute for Electric Efficiency
IHM	Interface Homem Máquina
IMG	Estação Imigrantes
ITQ	Estação Itaquera
JAB	Estação Jabaquara
JPA	Estação Jardim São Paulo
JQM	Estação São Joaquim
JUD	Estação São Judas

kA	Kiloampére
kbytes	Kilobytes
kHz	Kilohertz
kV	KiloVolt
kW	Kilowatt
kWH	Kilowatt hora
LIB	Estação Liberdade
LRC	Longitudinal Redundancy Check
LUZ	Estação Luz
MW	Megawatt
PAT	Pátio Jabaquara
PCA	Estação Patriarca
PDS	Estação Pedro Segundo
PIG	Estação Parada Inglesa
PIT	Pátio Itaquera
PPQ	Estação Ponte Pequena
PSE	Praça Da Sé
PSO	Estação Paraíso
RDTD	Registrador Digital de Tarifação Diferenciada
REP	Praça da República
RNA	Redes Neurais Artificiais
SAC	Estação Sacomã
SAN	Estação Santana
SAU	Estação Saúde
SCZ	Estação Santa Cruz
SUM	Estação Sumaré
TAT	Estação Tatuapé
TRD	Estação Tiradentes
TTI	Estação Tamanduateí
TUC	Estação Tucuruvi
UCA	Utility Communications Architecture
UTR	Unidade de Transmissão Remota

VPT	Estação Vila Prudente
WAR	Subestação Retificadora Praça da Árvore
WCP	Subestação Retificadora Capão Redondo
WGC	Subestação Retificadora Giovanni Gronchi
WJA	Subestação Retificadora Jabaquara
WJQ	Subestação Retificadora São Joaquim
WJU	Subestação Retificadora São Judas
WLU	Subestação Retificadora Luz
WPS	Subestação Retificadora Pedro II
WSE	Subestação Retificadora Sé
WTR	Subestação Retificadora Largo Treze
WTT	Subestação Retificadora Tietê
WVB	Subestação Retificadora Vila das Belezas
WVM	Subestação Retificadora Vila Mariana
WZI	Subestação Retificadora Zuquim
YBF	Subestação Primária Barra Funda
YCE	Subestação Primária Canindé
YCG	Subestação Primária Giovanni Gronchi
YCI	Subestação Primária Cambuci
YPS	Subestação Primária Pedro Segundo
YSA	Subestação Primária Saúde
YTA	Subestação Primária Tatuapé
YVP	Subestação Primária Vila Esperança

SUMÁRIO

1 APRESENTAÇÃO.....	15
1.1 INTRODUÇÃO.....	15
1.2 OBJETIVOS.....	18
1.2.1 Objetivo Geral.....	18
1.2.2 Objetivos Específicos.....	18
1.3 ORGANIZAÇÃO DO ESTUDO.....	19
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	20
2.1 HISTÓRICO.....	20
2.1.1 Conceituação.....	21
2.1.2 Gestão De Energia Elétrica Nos Transportes.....	22
2.2 SCILAB – SOFTWARE LIVRE.....	24
2.3 REDES NEURAIS ARTIFICIAIS (RNA).....	26
2.3.1 Procedimentos Estatísticos de Previsão.....	30
2.3.2 Tipos de Aplicação.....	32
3 SISTEMA DE MONITORAÇÃO DE ENERGIA CONSUMIDA.....	33
3.1 SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO ELÉTRICA DO METRÔ DE SÃO PAULO.....	33
3.2 SISTEMA DE MONITORAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA DAS SUBESTAÇÕES PRIMÁRIAS.....	38
3.3 SISTEMA DE MONITORAÇÃO DE ULTRAPASSAGEM DE DEMANDA.....	41
3.4 SUBSTITUIÇÃO DE MEDIDORES DE ENERGIA DAS SUBESTAÇÕES RETIFICADORAS.....	44
3.4.1 Subestação Retificadora.....	44
3.4.2 Medidores.....	47
4. IMPLANTAÇÃO E APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA.....	48
4.1 IHM DE MONITORAÇÃO DE DEMANDA DE ENERGIA.....	48
4.2 MONITORAÇÃO DA ULTRAPASSAGEM DA DEMANDA CONTRATADA DE ENERGIA.....	49
4.3 MONITORAÇÃO DAS SUBESTAÇÕES RETIFICADORAS.....	50

4.4 MONITORAÇÃO DAS SUBESTAÇÕES PRIMÁRIAS.....	50
4.5 SISTEMA DE MONITORAÇÃO DA DEMANDA DE ENERGIA.....	52
4.6 CONSTRUÇÃO DE SISTEMA DE MONITORAÇÃO DE ULTRAPASSAGEM DE DEMANDA.....	54
4.6.1 Treinamento da Rede Neural	54
4.7 MONITORAÇÃO DAS SUBESTAÇÕES RETIFICADORAS	60
4.7.1 Medições	60
4.7.2 Vantagens da Monitoração	63
4.8 PESQUISA DE PREÇO	63
 5 SUGESTÃO DE NOVOS ESTUDOS	 64
 6. CONCLUSÃO.....	 66
 REFERÊNCIAS	 69
 ANEXOS	 71

1 APRESENTAÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO

Numa época de perplexidade diante das mudanças no clima, economia conturbada, extrema concorrência por mercados devido à globalização, que atinge todos os âmbitos indistintamente, quer no setor privado – serviços, comércio, indústria –, quer na administração pública, palavras de ordem como redução do desperdício, busca pela eficiência e gestão de custos estão em voga. Todo negócio em qualquer setor pode e deve adaptar-se a essa tendência.

As empresas precisam ser competitivas, o que significa empregar estratégias de baixo custo, mas que não impliquem diminuição da qualidade. A preocupação com eficiência e custo é mundial. Um exemplo é a estação de metrô de Coney Island, em Nova York, que implantou neste ano de 2010 um avançado sistema térmico com base em 48 painéis solares que fornece água quente para lavar os carros de metrô e também para as dependências usadas pelos empregados. Junto com um sistema de iluminação instalado em alguns dos edifícios, espera-se economia de 170.000 dólares por ano – e corte nas emissões de CO₂ de mais de 3.000 toneladas (NEW YORK POWER AUTHORITY, 2010).

Nas megacidades, como São Paulo, Nova York, Rio de Janeiro, Madri, Londres etc., a solução para o transporte público tem sido o investimento no metrô, tanto de superfície como subterrâneo. Afinal, os trens de passageiros são seguros e pouco prejudiciais ao meio ambiente, com malha ferroviária razoável, estações bem localizadas, embarque facilitado, limpeza e pontualidade constante. No Brasil não há dados disponíveis, mas na cidade do Porto, em Portugal, após a implantação das linhas de metrô em 2001, uma pesquisa revelou que 11.000 veículos entre carros (23,6% dos passageiros) e ônibus (45,9% dos passageiros) deixaram de trafegar pela cidade (QMETRICS 2007 apud METRÔ DO PORTO, 2010).

Porém, a implantação de uma linha de metrô exige altos investimentos, e os custos de manutenção são altos e sempre acabam recaindo sobre o usuário. Dessa

forma, existe uma meta constante a ser perseguida, que é a aplicação de um modelo de baixo custo nas operações, sem perda de qualidade, utilizando duas ferramentas fundamentais: inovação e senso comum.

Para dar uma ideia da dimensão de consumo nacional, cabe lembrar que cerca de 43% de toda a energia gerada nos Estados Unidos é usada nos transportes, e somente cerca de 11% nos lares (THE FUTURES CHANNEL, 2010).

Um exemplo dessa tendência é o metrô de Santiago, no Chile, que está desenvolvendo quatro projetos de eficiência energética que permitirão economizar cerca de 35 GWatts por ano, o que equivale ao consumo energético de 19.400 lares chilenos, deixando-se ainda de emitir 15.300 toneladas de CO₂ (METRÔ DE SANTIAGO, 2010). O metrô de Madri, na Espanha, também pôs em prática medidas de eficiência energética, como “freio regenerativo”, com o que se recupera e armazena energia durante a frenagem para utilizar na partida (economia de 41 GWatts por ano); diminuição da velocidade das escadas rolantes quando não estão sendo usadas; utilização de energia geotérmica do subsolo para climatização, entre outras (TWENERGY, 2010).

No Brasil, devido a mudanças introduzidas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) nas regras de fornecimento de energia pelas concessionárias, o monitoramento da energia torna-se crucial na gestão do custo, principalmente em razão das especificidades de consumo do sistema de transporte metroviário.

O termo “monitoração” é definido como ato de acompanhar. Na área técnica, significa a monitoração através de aparelhos técnicos.

A necessidade da Companhia do Metropolitano de São Paulo, ou simplesmente Metrô, como é conhecido, de monitorar de forma mais acurada o consumo de energia elétrica não se deve apenas ao fato de ser esse o segundo maior custo da empresa, mas aos benefícios de poder compreender melhor as causas e assim obter maior visibilidade e conseqüentemente poder otimizar a qualidade das informações para a tomada de decisões.

Para o Metrô de São Paulo, não basta obter dados finalizados sobre o gasto mensal, como o consumidor comum, que sabe no final do mês quantos watts consumiu e quanto deverá pagar por isso. No contrato de fornecimento de energia para o Metrô, existe um limite de demanda contratada que não pode ser ultrapassado, o que acarreta penalização em forma de alta sobretaxa na tarifação do

excedente. Inúmeros fatores peculiares concorrem para que em muitos momentos do dia esse limite seja ultrapassado. E uma das formas mais eficientes para evitar ultrapassar o limite é a monitoração do consumo de energia de forma pontual e contínua. E de um sistema eficiente o Metrô carece.

Dessa forma, está no escopo deste trabalho propor um modelo que inclui uma nova forma de monitoração do consumo de energia nas subestações primárias, a detecção preditiva instantânea e/ou diária de ultrapassagem da demanda contratada de energia, para que decisões sejam tomadas com o intuito de evitar multas, e um estudo para substituição dos medidores de consumo nas subestações retificadoras.

Atualmente o Metrô não dispõe de um sistema próprio para monitorar a energia consumida em cada instante nem ao final do dia. A concessionária é quem fornece os valores de consumo de energia e só do dia anterior. Um estudo de viabilidade com fornecedores externos foi feito, porém o custo para implantação e a dependência desses fornecedores impediram que o negócio se concretizasse.

Em virtude dessa condição, foi o objetivo de nós pesquisadores deste estudo buscar uma solução para o problema, com a criação de um sistema inovador de monitoração de forma econômica e eficiente.

Com a adesão às mudanças autorizadas pela Aneel na forma da contratação de energia, passando de consumidor cativo para consumidor livre, o Metrô obteve taxas menores, porém com menor flexibilidade, ou seja, em caso de ultrapassagem da demanda contratada de energia o contratante é penalizado com multas.

A Resolução 456/2000 da Aneel, conhecida como Revisão das Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica, elenca em 125 artigos as novas condições de fornecimento de energia. A resolução sintetiza outras portarias e normas que legislavam sobre o assunto, sendo a mais importante a Portaria 466/1999, e torna as regras mais atualizadas com a realidade tecnológica atual do setor elétrico, desde que se deu a desregulamentação, em 1995 (ANEEL, RESOLUÇÃO 456).

Diante dessa necessidade, o Metrô chegou a adquirir um sistema de monitoração para informar previamente a ultrapassagem de demanda, porém o sistema computacional se mostrou ineficiente e acabou sendo desativado. Assim, este trabalho procura preencher essa lacuna, pois o modelo proposto possibilita prever a ultrapassagem da demanda, com a utilização de um sistema computacional

que utiliza redes neurais artificiais, e permitir que sejam tomadas providências a tempo para que multas sejam evitadas.

O estudo de substituição dos medidores em obsolescência das subestações retificadoras do Metrô com a monitoração de dispositivos por sistemas computacionais oferece fontes importantes para minimização de custos e melhoria da eficiência em diversos setores. Este trabalho traz um breve estudo de substituição dos medidores e mostra os benefícios que isso pode oferecer.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Este estudo tem como objetivo geral permitir por meio da implantação de um sistema computacional no Metrô de São Paulo a partir da utilização de redes neurais artificiais a monitoração na forma gráfica e em valores numéricos da energia consumida nas subestações primárias e subestações retificadoras, a fim de fornecer subsídios para o melhor gerenciamento de energia consumida e auxiliar na análise de dados e tomada de decisões para evitar multas por ultrapassagem da demanda.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Confrontar os valores de consumo medidos com as contas de energia enviadas pela fornecedora de energia.
- Monitorar a demanda de energia consumida em tempo real.

- Emitir alarme em caso de previsão de ultrapassagem da demanda contratada.
- Estudar a viabilidade para monitorar a energia consumida nas subestações retificadoras.
- Mostrar medições e os medidores eletrônicos nas novas subestações retificadoras do Metrô.
- Apresentar propostas de melhoria no sistema metroviário.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No Capítulo 1, Introdução, contextualiza-se a questão no Brasil e no mundo da necessidade de busca pela eficiência energética no setor de transporte metroferroviário.

No Capítulo 2, é apresentada uma revisão da literatura, com os conceitos e estudos relevantes sobre sistemas metroviários e tecnologias empregados em monitoração de energia. Relatam-se brevemente sistemas de controle inteligentes, protocolos de comunicação e redes de computadores. Também se faz uma explanação sobre redes neurais artificiais.

O Capítulo 3 descreve as configurações das subestações primárias, subestações retificadoras e os medidores utilizados na monitoração do fornecimento e consumo de energia do Metrô, além do sistema computacional e funcionalidades.

O Capítulo 4, Metodologia, explica o sistema de monitoração proposto, a arquitetura e funcionalidades. Traz um exemplo prático efetuado pelos autores deste estudo com as medições efetuadas nas subestações retificadoras e apresenta um estudo para substituição dos medidores eletromecânicos nessas subestações.

No Capítulo 5, são oferecidas sugestões para trabalhos futuros.

No Capítulo 6, são apresentadas as conclusões da investigação realizada.

Finalizando com as referências utilizadas e anexos.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo trata da revisão da literatura e experimentos sobre o tema, com uma introdução à monitoração e controle de energia elétrica e gerenciamento de demanda, desenvolvidos com sistemas computacionais livres.

2.1 HISTÓRICO

O combate às mudanças climáticas e preservação da natureza tem obrigado as empresas no mundo todo a mudança de conduta devido principalmente à pressão dos ambientalistas e dos consumidores em geral. Além disso, a necessária e premente busca pela redução de custos, principalmente no que tange ao consumo de energia elétrica, tem sido motivo de preocupação, o que impulsiona o desenvolvimento de estudos para encontrar soluções. O uso racional e eficiente da energia elétrica viabiliza mais rapidamente que outros métodos – como construção de hidrelétricas e termoeletricas, importação de gás natural e energia de países vizinhos etc. – solução para o problema. Os resultados de redução de consumo são imediatos.

Na definição empregada pelas Centrais Elétricas Brasileiras (Eletrobrás)¹, “Conservar energia elétrica quer dizer melhorar a maneira de utilizar a energia, sem abrir mão do conforto e das vantagens que ela proporciona. Significa diminuir o consumo, reduzindo custos, sem perder, em momento algum, a eficiência e a qualidade dos serviços” (ELETROBRÁS, 2010).

De acordo com Alvarez (1998):

¹ A Eletrobras, empresa de capital aberto controlada pelo governo brasileiro, atua na área de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Com foco em rentabilidade, competitividade, integração e sustentabilidade, a companhia lidera um sistema composto de doze subsidiárias, uma empresa de participações (Eletrobras Eletropar), um centro de pesquisas (Eletrobras Cepel) e metade do capital de Itaipu Binacional (ELETROBRÁS, 2010).

Uma das linhas de ação para promover o uso racional e eficiente de energia elétrica é a intervenção junto a instalações consumidoras. Através de ações que otimizam os sistemas de cada uso final de energia elétrica presentes na instalação, é possível reduzir seu consumo sem comprometer. Para analisar a viabilidade técnica e econômica dessas ações seu desempenho, é preciso, inicialmente, determinar a forma como a energia elétrica está sendo utilizada, procedimento este chamado de diagnóstico energético (ALVAREZ, 1998).

Uma das medidas adotadas por meio de Decreto Presidencial de 08.12.1993 no Brasil foi o Selo Procel de Economia de Energia, cujo objetivo é orientar o consumidor na hora de comprar sobre os produtos que apresentam melhores níveis de eficácia energética dentro de cada categoria, como refrigeradores, aparelhos de ar condicionado, motores elétricos etc.

A questão da eficácia energética principalmente na área de transportes está no centro dessa discussão, visto que é um setor que consome grande quantidade de energia em relação aos demais.

Especificamente para este estudo, interessa conhecer as formas de gestão de consumo e eficácia energética no setor de transporte metroferroviário.

2.1.1 Conceituação

O monitoramento de energia elétrica é um processo de medir, comparar e sinalizar a corrente elétrica que passa por dois pontos em série, em uma rede de distribuição de energia elétrica, utilizando sensores eletromagnéticos para captar os sinais e microprocessadores eletrônicos para monitoramento dos sinais.

O termo gerenciamento é definido como ato de administrar. Na área de utilização de energia elétrica, a definição de gerenciamento está diretamente ligada ao uso eficiente. As ferramentas utilizadas no processo de busca e manutenção da eficiência no uso da energia são projetadas para fornecer informações essenciais para fundamentar as decisões dos gestores. Como exemplo, cita-se o gerenciamento de consumo, que cria o histórico de consumo de energia da unidade em relação à utilização e os usos finais da eletricidade. As ferramentas geram ainda

relatórios e gráficos utilizados para acompanhamento e verificação da eficiência das iniciativas aplicadas às unidades monitoradas e identificação de comportamentos de uso.

2.1.2 Gestão de Energia Elétrica nos Transportes

Devido ao fato de a energia elétrica corresponder ao segundo maior custo operacional do Metrô de São Paulo, a empresa não teve outra saída a não ser investir na modernização do sistema para captação das informações de consumo a fim de melhorar a visibilidade do sistema de energia e torná-lo junto com o sistema de tráfego mais eficiente.

Turbuk e Ganzarolli (1992) propuseram alterações nos níveis de desempenho dos trens pelo Sistema de Controle Centralizado (SCC) a fim de que, durante a situação atípica em que duas subestações primárias suprissem a carga do sistema em vez de três, não ocorresse a atuação do sistema de proteção, com consequências prejudiciais ao sistema.

Essa situação atípica ocorre em virtude de falha no fornecimento de energia de uma subestação primária. Existem setores independentes que recebem a alimentação de 22 kV da subestação primária e distribuem a energia para as respectivas subestações retificadoras do setor. Cada setor, apesar de independente, pode permitir interligações, socorrendo assim a subestação primária com falta de alimentação e mantendo todo o sistema de energia alimentado.

Turbuk e Ganzarolli (1992) propõem estratégias operacionais que atuam na movimentação dos trens. Impondo restrições ao “nível de desempenho” das composições em determinados trechos da linha, é possível alterar as curvas características de partida dos trens. Ou seja, reduzindo a aceleração dos trens, pode-se impedir a falta de alimentação de energia de uma segunda subestação primária por sobrecarga.

Os autores (1992) defendem a implantação de um sistema em tempo real, utilizando sinais obtidos diretamente de registradores microprocessados chamados

de Registradores Digitais de Tarifação Diferenciada (RDTD) das subestações primárias, esperando prever desvios e sobrecargas dentro do intervalo de integração, de quinze minutos, para atuar no sistema de controle de tráfego. Evitava-se desse modo a ultrapassagem de demanda e também se permitia o ajuste contínuo da programação horária dos trens, aliando máximo desempenho com o mínimo consumo de energia.

Porém, problemas na implantação do sistema em tempo real, como falta de infraestrutura e também a cultura operacional da época de não interferir no sistema de tráfego, fizeram com que a idéia original não fosse viabilizada de imediato.

Em 1999, iniciou-se o processo de modernização do Centro de Controle Operacional (CCO), adicionado-se funcionalidades ao sistema elétrico. Uma das principais modificações foi a possibilidade de obter dados a partir dos sinais oriundos dos medidores de energia elétrica instalados nas subestações primárias.

Em 2002, iniciou-se a troca dos medidores antigos (RDTD) por Medidores Eletrônicos de Massa (MEM). Os MEM são mais confiáveis e de melhor precisão, além de dispor de saída dedicada para envio dos sinais (pulsos de demanda) para o consumidor.

Em 2005, foi concluída a implantação, aquisição e tratamento dos sinais pelo Sistema de Controle Centralizado (SCC). Estes sinais, denominados “RDTD’s”, eram tratados por um servidor que sinalizava no console de energia quando se estivesse diante de uma provável ultrapassagem da demanda contratada de energia.

A função do sistema de monitoração e controle de demanda era atuar em dois momentos. O primeiro quando ocorresse falta de alimentação elétrica em uma das subestações primárias, ficando o sistema elétrico alimentado por duas subestações primárias; e o segundo quando todas as subestações primárias estivessem alimentando o sistema elétrico.

No primeiro caso, a falta da alimentação elétrica de uma subestação primária pode ocorrer em qualquer hora da operação comercial. “Este método pode ser utilizado, porém com ressalvas ao número de trens principalmente nos horários de pico dos mesmos” (BRAGA;ARROMBA;KESTENER, 2007).

Porém, devido à falta de informações acuradas, o servidor que tinha essa funcionalidade foi desativado, pois não era eficiente para determinar com precisão uma futura ultrapassagem da demanda contratada.

Posteriormente, a partir da ideia de controle de trens de Turbuk e Ganzarolli, foi elaborado um estudo por Braga, Arromba e Kestener (2007) que objetivava fazer análise e verificação do desempenho dos trens circulando divididos em setores para evitar ultrapassagem de demanda contratada. Este trabalho acabou não sendo implantado, pois dependia de uma previsão correta da ultrapassagem da demanda contratada de energia.

2.2 SCILAB – SOFTWARE LIVRE

Em virtude de o servidor de previsão de ultrapassagem de demanda ter sido desativado, visto que o algoritmo matemático desenvolvido era impreciso na detecção das ultrapassagens, neste projeto optou-se pela aplicação de redes neurais artificiais, com o que é possível dar uma resposta a problemas dessa ordem.

Verificou-se então que o software livre Scilab, por conter a opção de se carregar o módulo (toolbox) de redes neurais artificiais, mostrou-se a ferramenta mais adequada para esse trabalho. O Scilab é um programa científico matemático e gráfico que vem sendo utilizado em escala cada vez maior, principalmente por ser um software livre e também com o código fonte livre (*open source*), o que propicia melhoramentos constantes pelos desenvolvedores ao redor do mundo.

Existem no mercado algumas ferramentas computacionais de ambiente de cálculo numérico como: Octave, MathCAD, Derive, Matematica, Maple e MatLab. Cabe salientar que as duas últimas se destacam – a Maple é mais direcionada para as ciências exatas; e a Matlab, usada por engenheiros, oferece rotina para resolução de problemas mais complexos. Entretanto, trata-se de programas proprietários, cuja utilização depende de pagamento de licenças obtidas dos fornecedores que têm alto custo.

Entre os programas de ferramentas de computação numérica do tipo código aberto que podem ser baixadas gratuitamente pela internet e usadas livremente sem a necessidade de pagamento de *royalties*, o Scilab é reconhecidamente mais eficiente na opinião dos utilizadores.

A ferramenta foi criada em 1989 pelo Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique (Inria), por meio do Projeto Métalau (Methods, algorithmes et logiciels pour l'automatique) e pela École Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC). Mas, a partir de maio de 2003, o Scilab passou a ser mantido por um consórcio com mais de vinte empresas denominado Consórcio SciLab. E mesmo sendo considerados uma ferramenta Computer Aided Control System Design (Cascd – Projeto de Sistemas Auxiliado por Computador), o Scilab é utilizado na prática como um poderoso sistema de computação, podendo até ser empregado em desenvolvimento de sistemas complexos de cálculos numéricos.

Rodando sob Windows (2003/XP/VISTA), GNU/Linux ou Mac OSX10.x Intel, o software pode ser empregado para várias finalidades: computação gráfica (criando gráficos 2D e 3D), resolução de sistemas lineares e não lineares, controle de processos, resolução de sistemas de equações diferenciais, controle clássico, robusto e otimização LMI, processamento de sinais, automação industrial, interface com linguagens Fortran, Tcl/Tk, C, C++, Java, LabView, etc. Portanto, é sem sombra de dúvida uma ferramenta completa no sentido de dar respostas rápidas em ambiente de computação numérica (PIRES, 2010)

Seguem abaixo as principais características da ferramenta de acordo com Pires (2010).

- 1) Como participante do sistema de Acesso Aberto (AO), a última versão do software está sempre disponível, geralmente via Internet pelo site dos desenvolvedores (SCILAB, 2010).
- 2) O software pode ser legalmente utilizado, copiado, distribuído, modificado.
- 3) Os resultados obtidos podem ser divulgados sem nenhuma restrição.
- 4) O acesso ao código fonte, evitando surpresas desagradáveis.
- 5) Os programas desenvolvidos podem ser transferidos para outras pessoas sem imposições de qualquer natureza.

6) O acesso a informação de alta qualidade.

7) A certeza de estar participando de uma comunidade cujo valor principal é irrestrita difusão do conhecimento.

8) É um software de distribuição gratuita, com código fonte disponível. Sua linguagem é simples e de fácil aprendizado.

9) Possui um sistema de auxílio ao usuário (help).

10) É um ambiente poderoso para geração de gráficos bidimensionais e tridimensionais, inclusive com animação.

11) Implementa diversas funções para manipulação de matrizes. As operações de concatenação, acesso e extração de elementos, transposição, adição e multiplicação de matrizes são facilmente realizadas.

12) Permite trabalhar com polinômios, funções de transferência, sistemas lineares e grafos.

13) Apresenta facilidades para a definição de funções.

14) Permite o acesso a rotinas escritas nas linguagens Fortran ou C.

15) Pode ser acessado por programas de computação.

2.3 REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

Em virtude de o servidor de previsão de ultrapassagem de demanda ter sido desativado pela Companhia do Metropolitano de São Paulo, pois o algoritmo matemático desenvolvido era impreciso na detecção destas ultrapassagens e a solução oferecida passava a ser demasiadamente complexa, a aplicação de redes neurais artificiais mostrou-se uma alternativa viável, com o que é possível a solução para problemas dessa ordem.

Redes neurais, lógica Fuzzy, sistemas especialistas e algoritmos genéticos são chamados de sistemas inteligentes.

As redes neurais artificiais (RNAs) são ferramentas de Inteligência Artificial que possuem a capacidade de se adaptar e de aprender a realizar uma tarefa, ou comportamento, a partir de um conjunto de exemplos dados (OSÓRIO; BITTENCOURT, 2000).

Na forma mais geral, uma rede neural é uma máquina projetada para modelar a maneira como o cérebro realiza uma tarefa particular ou função de interesse. A rede é normalmente implantada utilizando-se componentes eletrônicos ou simulada por programação em um computador digital (HAYKIN, 1999). Caracteriza-se a computação neural como uma ferramenta alternativa de computação que procura imitar o funcionamento do cérebro humano na solução de problemas de reconhecimento de padrões.

As redes neurais nada mais são que ferramentas de aproximação de funções que aprendem a relação entre variáveis independentes e dependentes, à semelhança da regressão ou outras abordagens mais tradicionais.

A principal diferença entre as redes neurais e as abordagens estatísticas é que aquelas não estabelecem hipóteses ou suposições sobre a distribuição ou propriedades dos dados e, dessa forma, tendem a ser mais úteis em situações práticas. As RNAs constituem também uma abordagem inerentemente não-linear, fornecendo mais precisão quando modelando dados de padrões complexos. Existem vários tipos de rede, cada uma com diferentes objetivos, arquitetura e algoritmo de aprendizagem (SMITH; GUPTA, 2000).

Uma RNA é formada pela interconexão de grande número de unidades de processamento não linear denominadas neurônios, que têm a propensão natural para armazenar conhecimento experimental e torná-lo disponível para o uso. Assim, de acordo com Freiman e Pamplona (2005), a RNA deve exibir características básicas similares ao comportamento humano, tais como:

- aprendizado: a rede aprende por experiência, através de treinamento baseado na apresentação de exemplos;
- associação: a rede é capaz de fazer associações entre padrões diferentes;

- **generalização:** ela é capaz de generalizar por exemplos anteriores, ou seja, responder corretamente a uma entrada nunca vista antes por similaridade aos padrões já apresentados.

O aprendizado ou treinamento tem como finalidade efetuar os ajustes necessários nos parâmetros da RNA, representados pelos pesos sinápticos. O objetivo dessa etapa é capacitar a rede a associar um dado de entrada com um grau de semelhança aos exemplos já apresentados. Entre os algoritmos que estabelecem como e quando as conexões devem ser atualizadas, o *back-propagation* é o mais difundido e será utilizado neste trabalho (KOSKO, 1992).

De forma geral, a teoria de RNA pode ser dividida em três tópicos básicos de acordo com Ludwig Junior e Montgomery (2007).

- 1) **neurônio artificial** – elemento básico, inspirado no neurônio biológico e constituído de três partes fundamentais: a) pesos sinápticos, que ponderam os valores das entradas do neurônio; b) regra de propagação, que define como as entradas serão combinadas no neurônio, em geral um somatório ponderado; c) Função de ativação, que determina o efeito que o resultado da regra de propagação terá sobre o nível de ativação do neurônio. A Figura 1 mostra um modelo simplificado de um neurônio biológico.

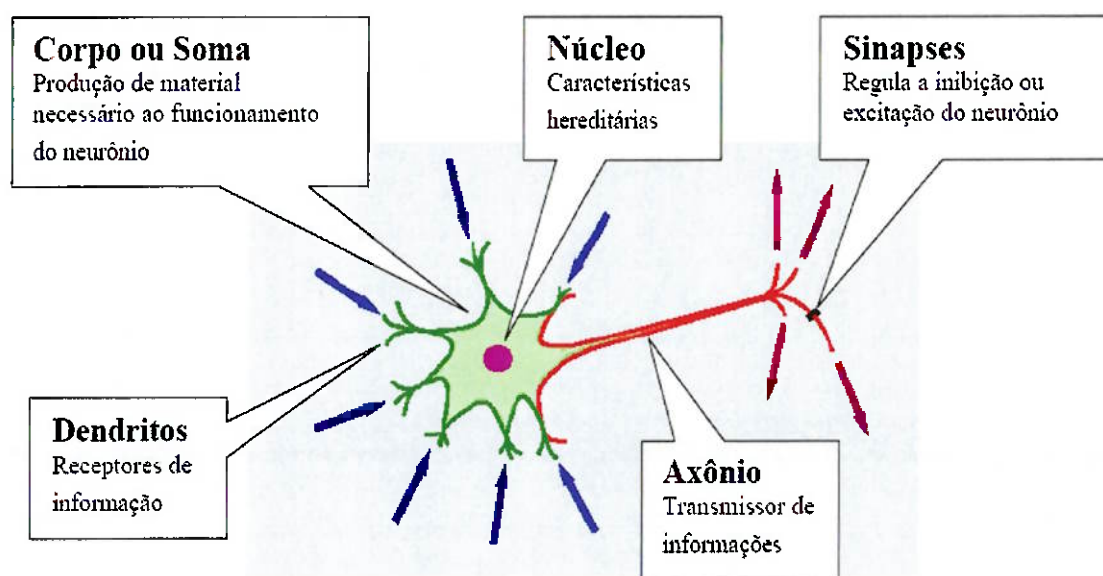


Figura 1 – Modelo de neurônio biológico

2) Topologia – modo de conexão entre os diferentes neurônios que formam a RNA. O encadeamento de vários neurônios forma as camadas. Em geral, a rede possui três ou mais camadas de neurônios, sendo que a primeira recebe o nome de “camada de entrada”, a última de “camada de saída” e a(s) camada(s) intermediária(s) de “camada(s) escondida(s)” ou oculta(s). Uma RNA com a topologia (2-4-4-1), Figura 2, indica que ela possui a camada de entrada com dois elementos processadores, duas camadas intermediárias (ocultas), cada qual com quatro elementos processadores e a camada de saída com apenas um elemento processador. O fluxo dos dados conforme o algoritmo *back-propagation* ocorre em dois sentidos: para frente e para trás.

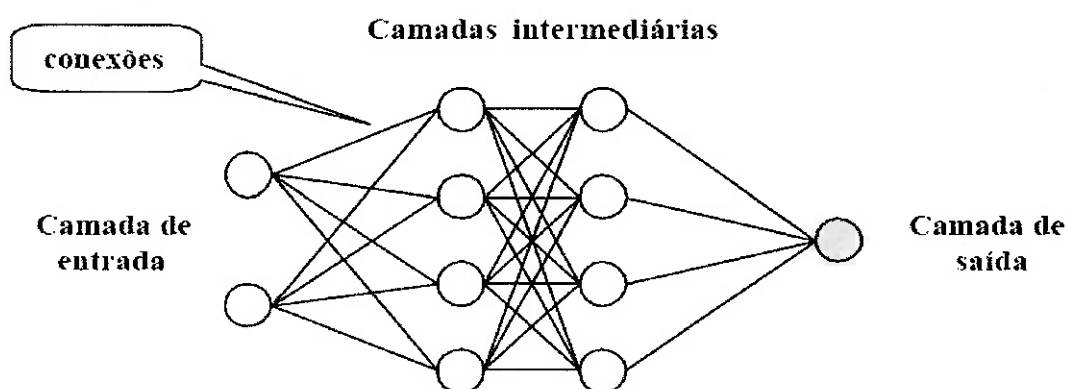


Figura 2 – Rede neural com a topologia (2-4-4-1)

Na Figura 3, tem-se o correspondente neurônio artificial.

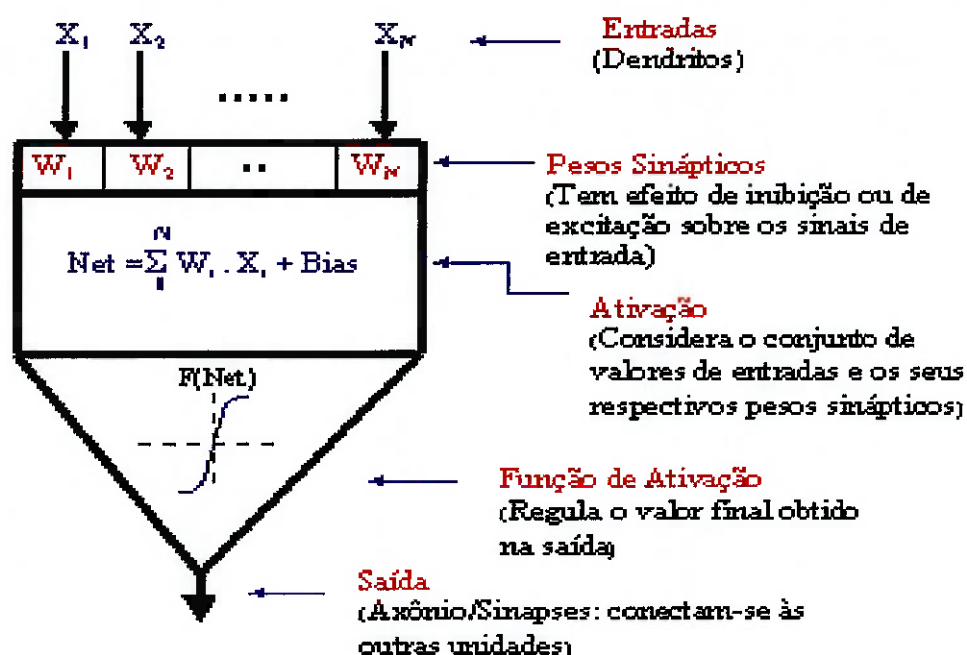


Figura 3 – Modelo de neurônio artificial Fonte: Osório & Bittencourt (2000)

3) **Aprendizado** – processo pelo qual a RNA aprende por meio dos padrões a ela apresentados. Os procedimentos de aprendizado (ou treinamento) que levam a RNA a aprender determinadas tarefas podem ser classificados em duas categorias: a) treinamento supervisionado, em que a rede é alimentada por dados de entrada e respectivos valores de saída (alvo); b) treinamento não supervisionado, que não requer valores de saída e em que a rede agrupa os valores de maior semelhança (*clusters*).

2.3.1 Procedimentos Estatísticos de Previsão

Tradicionalmente, dois modelos estatísticos de previsão são os mais utilizados: séries temporais e modelos de regressão. O primeiro tipo é baseado em dados históricos de uma variável, em que o princípio é reconhecer um padrão na série histórica de dados e extrapolá-los para o futuro por meio de um dos métodos aplicáveis aos modelos univariados, como, por exemplo, o método de Box-Jenkins.

Modelos de regressão consideram que a variável a ser prevista tem um relacionamento causa e efeito com uma ou mais variáveis independentes. Seu princípio é descobrir essa forma de relacionamento ou correlação e utilizá-la na previsão da variável dependente. Como exemplo, tem-se a regressão múltipla.

Com a mesma característica de poder realizar previsões, além de outras possibilidades, as redes neurais artificiais surgem como alternativa ao procedimento estatístico. Aproveitam-se aqui as características próprias, como nas situações em que são exigidas inferências de relações não lineares complexas entre as variáveis de entrada e de saída de um modelo previsor.

2.3.2 Tipos de Aplicação

As aplicações das redes neurais são inúmeras, atendendo a diferentes tipos de tarefa, tais como:

- reconhecimento de padrões (reconhecimento de faces humanas);
- classificação de dados (reconhecimento ótico de caracteres);
- predição (previsão de séries temporais, como cotações em bolsas de valores);
- controle de processos e aproximação de funções (robótica);
- análise e processamento de sinais;
- filtros contra ruídos eletrônicos;
- análise de imagens e de voz;
- avaliação de crédito e diversas outras possibilidades, já que as pesquisas na área estão em contínuo desenvolvimento, surgindo a cada dia novas aplicações.

Neste trabalho, a aplicação de redes neurais artificiais irá prever e informar a ultrapassagem de demanda contratada de energia.

No Capítulo 3, a seguir, serão descritos os três itens principais do projeto: desenvolvimento do software para tratamento dos dados, utilização de redes neurais aplicadas e exemplo prático com base em medições em campo.

3 SISTEMA DE MONITORAÇÃO DA ENERGIA CONSUMIDA

Este capítulo aborda os três itens básicos que compõem o projeto.

Primeiramente, descrevem-se as subestações primárias e o desenvolvimento computacional para tratamento dos dados e apresentação das informações.

A seguir, o desenvolvimento computacional para obtenção dos dados com a aplicação redes neurais artificiais para monitorar, prever e sinalizar a ultrapassagem da demanda contratada.

Finalmente, apresentam-se medições efetuadas no campo e um estudo de substituição dos medidores de energia eletromecânicos por medidores eletrônicos nas subestações retificadoras do Metrô.

3.1 SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO ELÉTRICA DO METRÔ DE SÃO PAULO

A energia elétrica utilizada na alimentação dos trens e de todos os equipamentos auxiliares do Metrô é fornecida pela concessionária na tensão nominal de 88 kV, 60 Hz. Os equipamentos localizados que recebem a alimentação elétrica da concessionária são denominados subestações primárias, que têm a função de transformar os 88 kV, 60Hz, em 22 kV, 60 Hz, e distribuir a energia para as subestações retificadoras que fazem parte de seu domínio.

O sistema de alimentação elétrica do Metrô é constituído por oito subestações primárias, Figura 4, a seguir, distribuídas ao longo das linhas 1, 2, 3 e 5. Identificadas por siglas, elas são: YCE, YCI, YSA, YPS, YTA E YVP, YBF e YGC.

As informações das subestações YCE, YCI, YSA, YPS, YTA e YVP são enviadas diretamente para o Sistema de Controle Centralizado (SCC), enquanto as informações das subestações primárias YBF e YGC são enviadas por uma linha privativa (LP) diretamente à área gestora de energia.

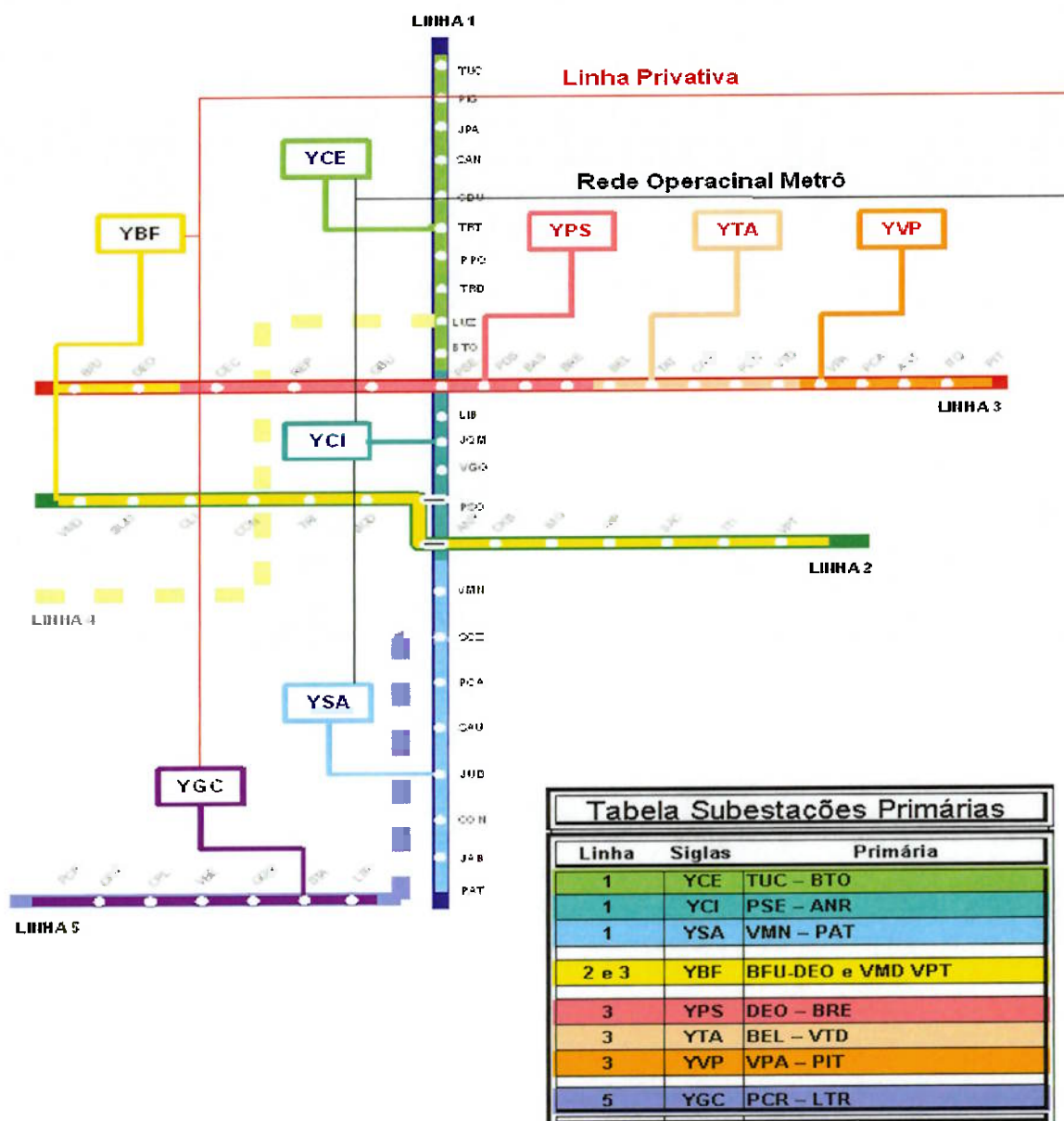


Figura 4 – Distribuição das subestações primárias do Metrô

Os principais componentes da subestação primária são:

- duas linhas de entrada (linha 1 e 2);
- dois barramentos de 88 kV (barra BI e BII);
- três transformadores de potência, separados por paredes corta-fogo;
- caixa de impedância (para aterramento do neutro dos transformadores);
- sala de comando, onde se localizam os cubículos de 22 kV e os painéis de comando e proteção da subestação, e
- sala de baterias.

As oito subestações primárias são agrupadas de tal maneira que cada uma alimenta determinado número de subestações retificadoras e auxiliares, obtendo-se

dessa maneira melhor distribuição das cargas. Este agrupamento é chamado de setor elétrico. Cada setor é eletricamente independente dos demais, contudo existe a possibilidade de interligá-los via barramento de 22 kV, para o caso de falta de energia em uma ou até duas subestações primárias.

Considerando que a alimentação em 88 kV apresenta baixo índice de falhas ou interrupções, que cada subestação primária possui alimentação distinta e independente e que é possível interligar um setor ao outro, obtém-se alto grau de confiabilidade do sistema.

Essa setorização se dá em função da configuração do sistema e dos equipamentos existentes. A Figura 5, a seguir, apresenta um diagrama de Transferência Automática de Setor (TAS), da Linha 1 – Azul, com as interligações entre as subestações primárias YCE, YCI e YSA. No diagrama é possível obter uma visão geral da interligação entre as subestações primárias e as subestações retificadoras.

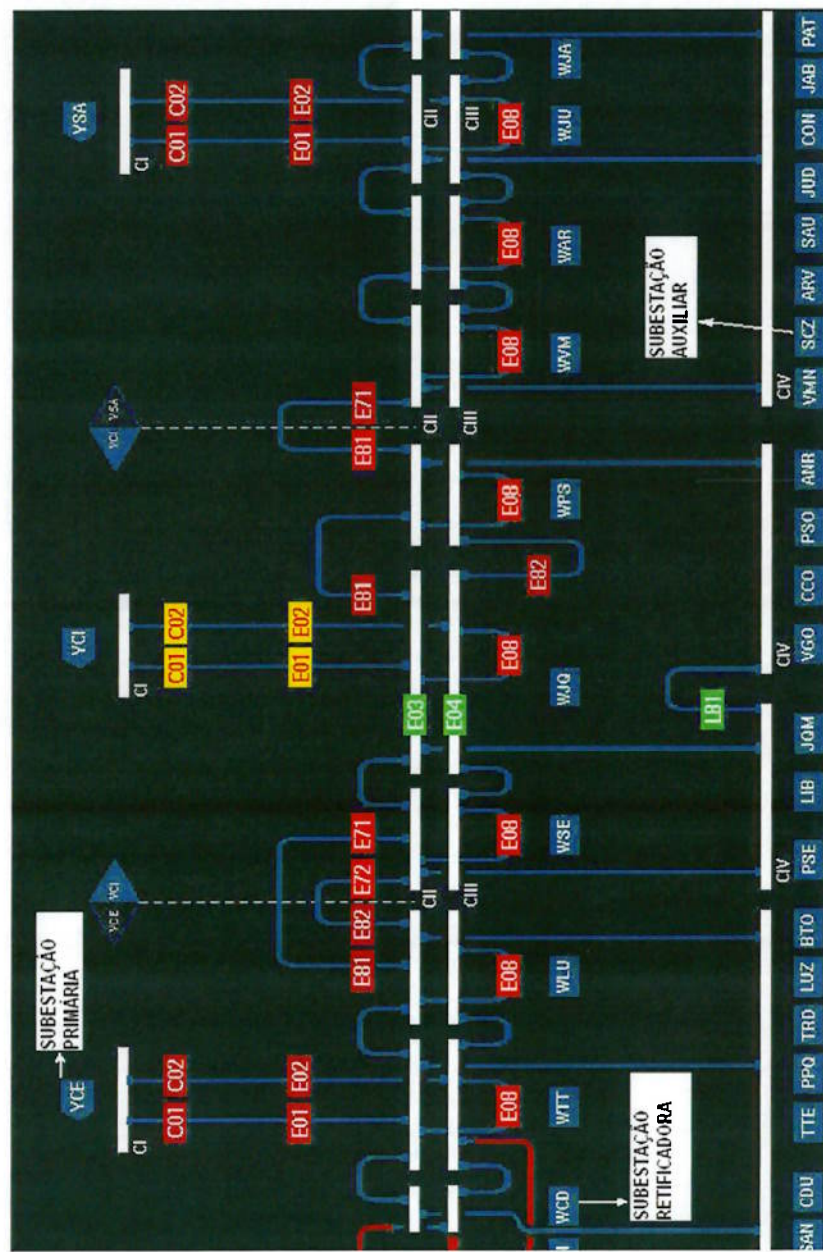


Figura 5 – Diagrama dos setores da Linha 1 – Azul

Legenda:

- CI: Barramento de saída das subestações primárias
- CIV: Barramento de saída das subestações auxiliares
- E08, E82: Disjuntores da lógica de interligação entre setores
- L81: Disjuntores de linha das subestações auxiliares

- CII e CIII: Barramentos (redundantes) de alimentação das subestações retificadoras (tração)
- C01,2 e E01,2: Disjuntores de entrada e saída das subestações primária e retificadora respectivamente
- E03 e E04: Disjuntores de tração

Este trabalho aborda a monitoração das subestações, que por sua vez é obtida pelo recebimento dos sinais digitais dos multimedidores de grandezas elétricas localizados em cada uma. A Figura 6, a seguir, mostra um diagrama genérico de interligação de uma subestação primária com uma subestação retificadora e o posicionamento dos medidores responsáveis pelo envio dos pulsos de demanda de energia para o Sistema de Controle Centralizado (SCC).

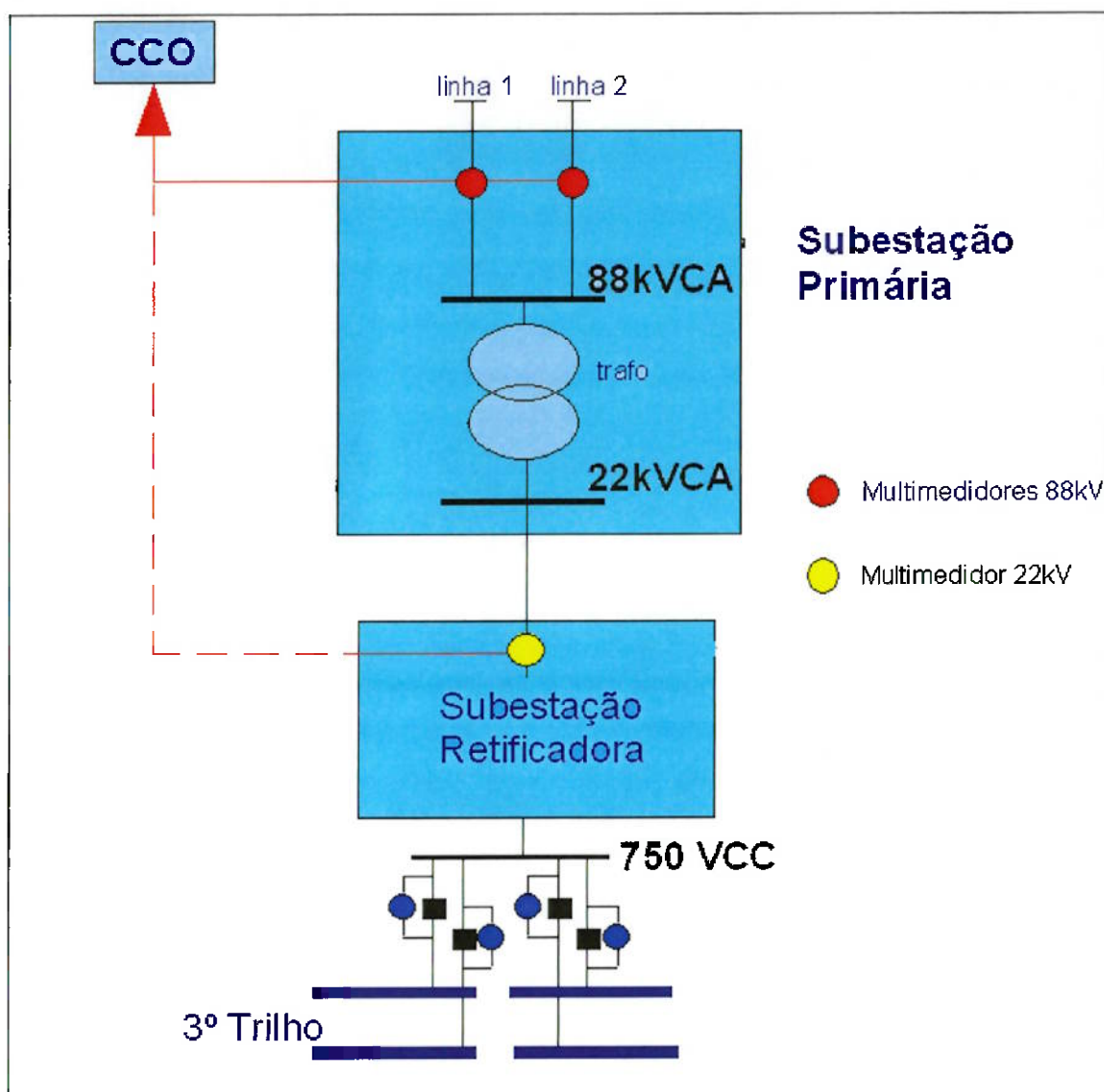


Figura 6 – Diagrama bloco de uma subestação primária do Metrô

3.2 SISTEMA DE MONITORAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA DAS SUBESTAÇÕES PRIMÁRIAS

As mensagens de demanda de consumo de energia das subestações primárias provenientes dos multimedidores SAGA 1000-A (características no ANEXO A) são enviadas para o Sistema de Controle Centralizado (SCC).

Os medidores enviam os pulsos totalizados da demanda consumida a cada intervalo de quinze minutos. Estes, por sua vez, são convertidos de RS485 para RS232 e processados pela UTR, que os reenvia para o servidor de controle no SCC, figura a seguir.

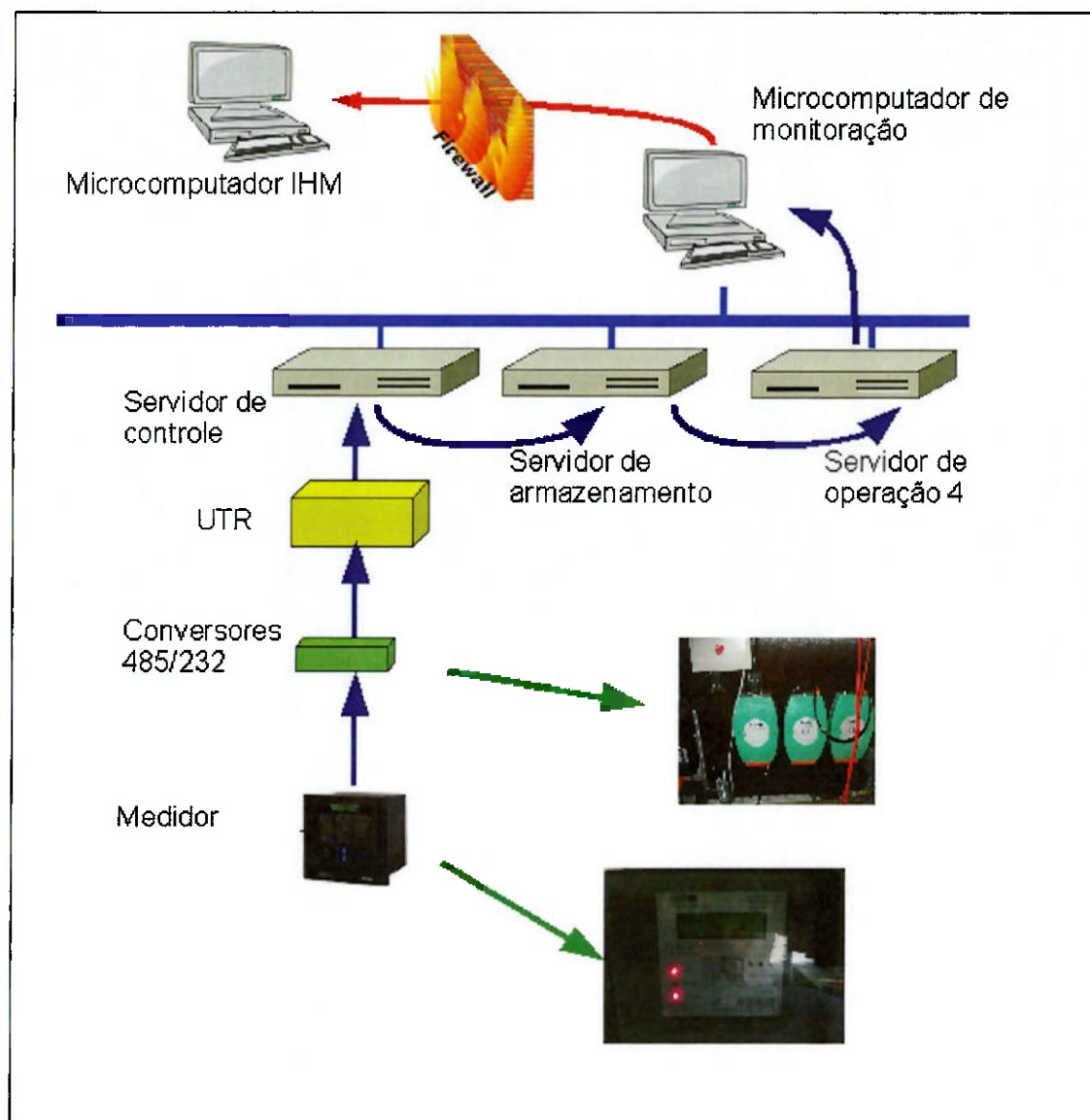


Figura 7 – Fluxo dos dados desde o medidor até o SCC

O “servidor de controle” envia esses dados, denominados RDTD, juntamente com as demais informações de entrada e saída trocadas entre os dispositivos de campo e o SCC, para o “servidor de armazenamento”, compondo arquivos denominados “dadosbrutos”, localizados no diretório “:/dadosbrutos” neste servidor.

Esses arquivos são referentes à linha correspondente e recebem a nomenclatura RBT_AAAAMMDD_L0X, sendo que:

AAAA = ano; MM = mês (1-12); DD = dia (1-31); X = linha (1, 2, 3 ou 5).

Exemplo: RBT_20100311_L01, dados brutos da Linha 1, dia 11 de março de 2010.

A Tabela 1 a seguir mostra o formato do pulso “RDTD parcial” no protocolo BAC (protocolo de comunicação proprietário da empresa Alstom, implantadora do sistema).

Tabela 1 – Formato do sinal “RDTD total”

Envio total de RDTD															
C1	DA	Ponto+	Ponto -	Ano	Mês	Dia	Hora	Minutos	Segundos	Δt +	Δt -	ΣDR +	ΣDR -	ΣDA +	ΣDA -
Δt = intervalo de tempo equivalente ao último pulso de sincronismo ΣDR = Somatório da Demanda Reativa referente ao início do último pulso de sincronismo ΣDA = Somatório da Demanda Ativa referente ao início do último pulso de sincronismo OBS: Os dados recebidos estão na base hexadecimal + = Bytes Mais Significativos - = Bytes Menos Significativos															

A seguir, exemplo de mensagens contendo os pulsos de “RDTDs totais”:

```
20/02/2010 00:00:05 35 d1 10 09 c1 da 00 02 1e 02 14 00 00 04 00 04 00 12 00 5c
20/02/2010 00:15:05 35 d1 10 09 c1 da 00 02 1e 02 14 00 0f 04 00 00 00 0f 00 4f
20/02/2010 00:30:04 35 d1 10 09 c1 da 00 02 1e 02 14 00 1e 03 00 07 00 0d 00 4c
```

No “servidor de armazenamento” foi desenvolvido o programa “captura_TOT”, que filtra as mensagens de “RDTDs totais” e as armazena em arquivos no mesmo servidor. Sincronizadamente, o programa “total” também no “servidor de armazenamento” faz a transmissão desses arquivos para o “servidor de operação 4”.

Por sua vez, o “servidor de operação 4” envia os arquivos para o “Microcomputador de monitoração de demanda”, que efetua a transmissão para o “microcomputador IHM” assim que as mensagens chegam.

No “microcomputador IHM” foi desenvolvido o programa “IHM_energia”, utilizando com a ferramenta Scilab. Este programa tem a função de apresentar uma tela gráfica ao usuário permitindo que se selecione a data e a subestação primária desejada.

Uma vez feito isso, o gráfico com a curva da demanda diária é apresentado

3.3 SISTEMA DE MONITORAÇÃO DE ULTRAPASSAGEM DE DEMANDA

As mensagens de demanda de consumo de energia das subestações primárias provenientes dos multimedidores SAGA 1000-A (características no ANEXO A) são enviadas para o Sistema de Controle Centralizado.

Estes multimedidores enviam os pulsos totalizados da demanda, denominados “RDTDs parciais”, a intervalos de vinte (20) segundos. Estes, por sua vez, são convertidos de RS485 para RS232 e são processados pela UTR, que os envia para o “servidor de controle” no Sistema de Controle Centralizado (SCC), Figura 8.

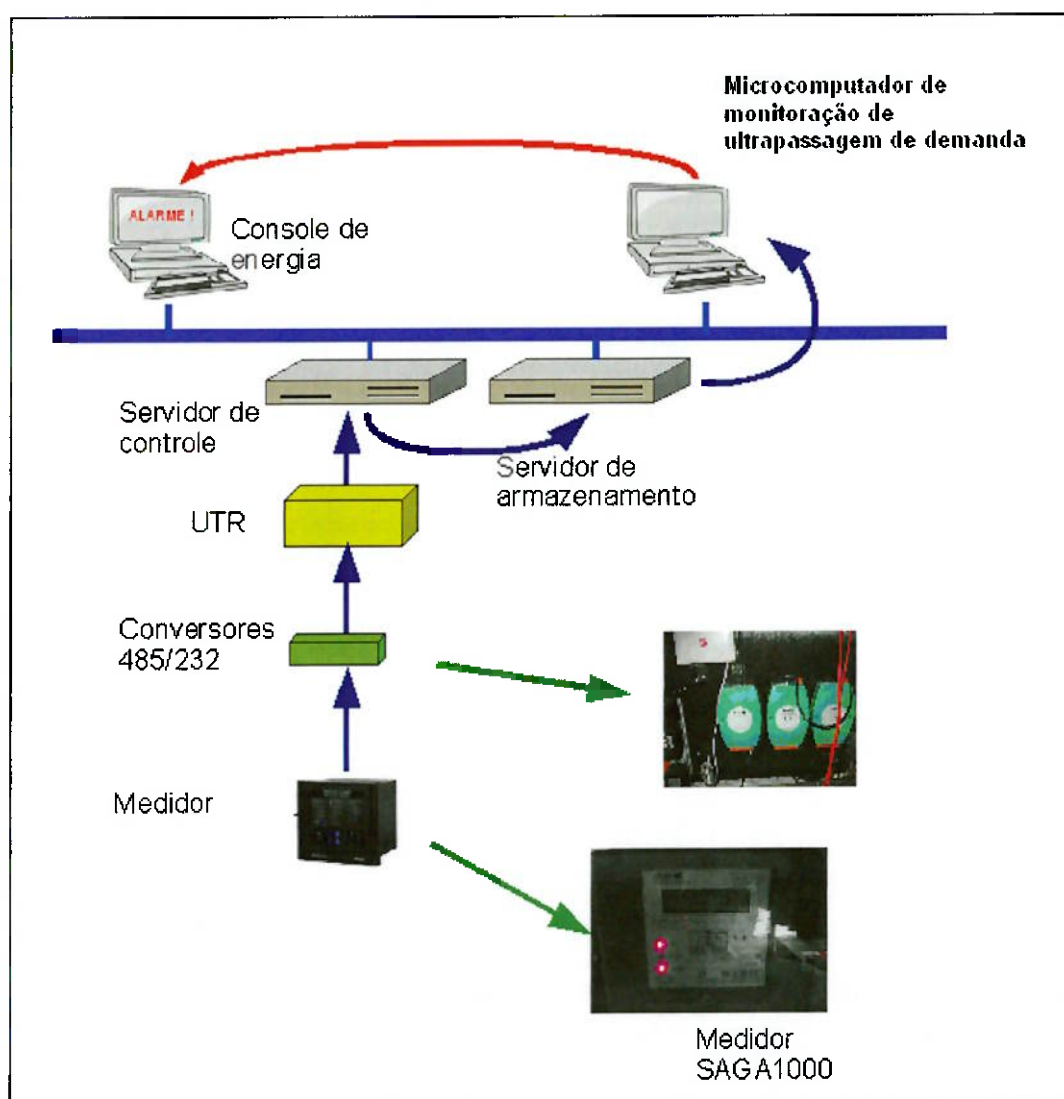


Figura 8 – Fluxo dos dados de controle da demanda

O “Servidor de controle” envia esses dados, denominados RDTD, juntamente com as demais informações de entrada e saída trocadas entre os dispositivos de campo e o SCC, para o “Servidor de armazenamento”, compondo arquivos denominados “dadosbrutos”, localizados no diretório “:/dadosbrutos” neste servidor.

Cada Linha tem o seu arquivo de “dadosbrutos” correspondente, com a nomenclatura RBT_AAAAMMDD_L0X, sendo que:

AAAA = ano; MM = mês (1-12); DD = dia (1-31); X = Linha (1, 2, 3 ou 5).

Exemplo: RBT_20100311_L01, dados brutos da Linha1, dia 11 de março de 2010.

A Tabela 2, a seguir, mostra o formato do pulso “RDTD parcial” no protocolo BAC (protocolo de comunicação proprietário da empresa Alstom, implantadora do sistema).

Tabela 2 – Formato da mensagem “RDTD parcial”

Envio parcial de RDTD

C1	D6	Ponto +	Ponto -	Δt +	Δt -	ΣDR +	ΣDR -	ΣDA +	ΣDA -
----	----	---------	---------	--------------	--------------	---------------	---------------	---------------	---------------

Δt = intervalo de tempo equivalente ao último pulso de sincronismo

ΣDR = Somatório da Demanda Reativa referente ao início do último pulso de sincronismo

ΣDA = Somatório da Demanda Ativa referente ao início do último pulso de sincronismo

OBS: Os dados recebidos estão na base hexadecimal

+ = Bytes Mais Significativos

- = Bytes Menos Significativos

A seguir, exemplo de mensagens contendo os pulsos de “RDTDs parciais”

20/02/2010 23:54:33 35 d1 10 09 c1 d6 00 02 57 94 00 09 00 30

20/02/2010 23:54:51 35 d1 10 09 c1 d6 00 02 5a 83 00 0a 00 32

20/02/2010 23:55:10 35 d1 10 09 c1 d6 00 02 5d 72 00 0a 00 34

No “servidor de armazenamento” foi desenvolvido o programa “captura_TOT”, que filtra as mensagens de “RDTDs parciais” e as armazenam em arquivos neste mesmo servidor. Sincronizadamente, o programa “parcial”, também no “servidor de

armazenamento”, faz a transmissão dos arquivos, a cada minuto, para o “microcomputador de ultrapassagem de demanda”.

No “microcomputador de ultrapassagem de demanda” foi utilizado a ferramenta Scilab, para desenvolver o programa “controle_demanda”. Este programa trabalha com o auxílio de um módulo de rede neural para interpretar e prever uma futura ultrapassagem de demanda. Cabe frisar que esse trabalho não toma decisões para evitar a ultrapassagem de demanda, estudos anteriores já foram feitos nesse sentido. O que ele faz é apenas apontar se ocorrerá uma ultrapassagem de demanda para que decisões possam ser tomadas.

A Figura 9, a seguir, mostra o caso em que ocorre ultrapassagem de demanda.

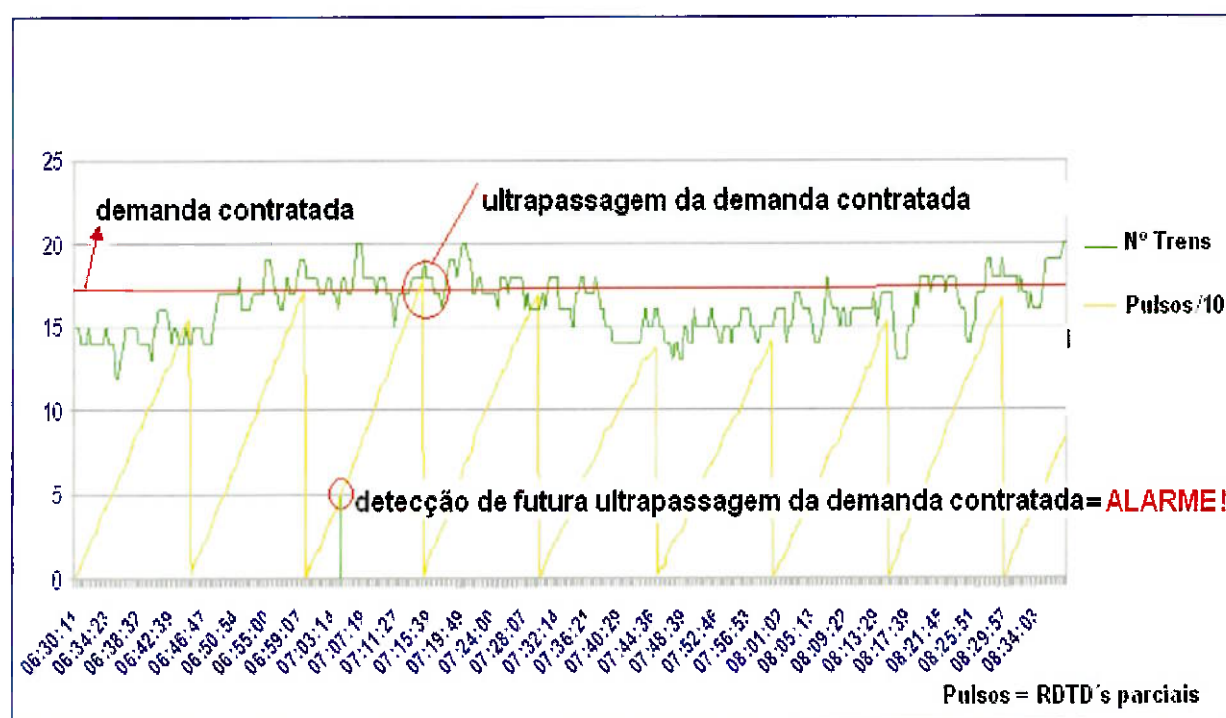


Figura 9 – Exemplo de ultrapassagem da demanda

3.4 SUBSTITUIÇÃO DE MEDIDORES ELETROMECAÂNICOS NAS SUBESTAÇÕES RETIFICADORAS

3.4.1 Subestação Retificadora

A principal função da S/E Retificadora é transformar os 22 kV em 750 Vcc para alimentação do terceiro trilho, que por sua vez alimentará a tração dos trens. A alimentação para o grupo retificador é feita através da barra CIV da subestação de 22 kV.

A subestação é constituída por um grupo retificador, normalmente em carga, alimentando o barramento positivo de 750 Vcc. Existe um segundo barramento, denominado reserva que pode ser interligado ao positivo através de um “feeder” (disjuntor extrarrápido de 750 Vcc).

Ao barramento principal estão conectados quatro “feeders” que alimentam os trechos do terceiro trilho; ao barramento reserva estão conectadas as seccionadoras reservas. No caso de necessidade de substituição de um “feeder”, deve-se fechar a respectiva seccionadora reserva e fechar em seguida o “feeder” reserva.

Na subestação retificadora também existem dois outros tipos de seccionadora: a seccionadora de equalização, que tem a função de equalizar o terceiro trilho e garantir a continuidade da alimentação elétrica para os trens; e a seccionadora de isolamento, que tem a função de isolar a subestação retificadora do terceiro trilho.

A Figura 10 mostra o esquema geral da subestação retificadora e o disjuntor E11 da subestação de 22 kV

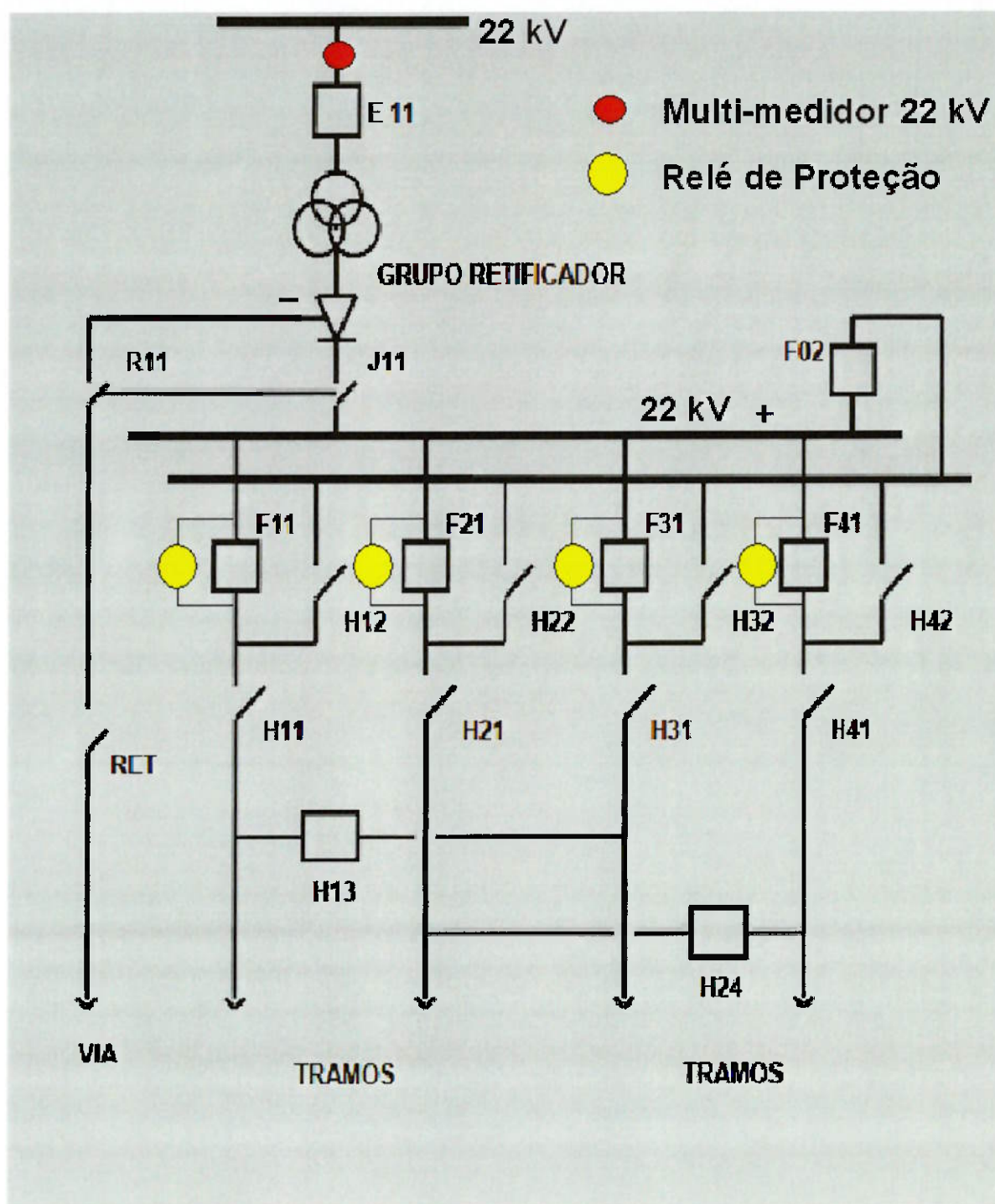


Figura 10 – Esquema típico de uma subestação retificadora

O Grupo Retificador possui duas seccionadoras: uma positiva (J11) e outra negativa (R11), que são interligadas, ou seja, com um único comando conseguem-se operar as duas seccionadoras. Existe ainda a possibilidade do comando por meio de manivela.

A barra negativa praticamente não existe: há na realidade uma conexão por cabo, de saída da seccionadora R11 à seccionadora negativa de retorno, chamada RET.

A barra positiva é que alimenta os “feeders” F11, F21, F31 e F41; e a barra positiva reserva é alimentada por meio do F02.

A configuração dos alimentadores é apresentada na Figura 11, onde se podem ver os feeders e cada uma das seccionadoras reservas de isolamento e seccionadoras de equalização.

Feeders : F11, F21, F31, F41 e F02

Seccionadora reserva : H12, H22, H32 e H42

Seccionadora de isolamento : H11, H21, H31 e H41

Seccionadora de equalização : H13 e H24

Seccionadora de retorno : RET

Os disjuntores, tanto de substituição como titulares, possuem comando elétrico para fechamento e abertura. Os disjuntores possuem comando mecânico de abertura, que não deve ser utilizado pela operação na normalidade.

A seccionadora reserva e a de equalização têm comando elétrico motorizado, e também acionamento mecânico por manivela, caso haja defeito no motor ou no sistema elétrico de acionamento.

As seccionadoras RET e de isolamento possuem apenas comando mecânico por alavanca.

Verificou-se que quase a totalidade das subestações retificadoras do Metrô possuem medidores eletromecânicos nas respectivas entradas de 22 kV.

Apenas as subestações da Linha 5 e da extensão da Linha 2 (CKB,IMG, SAC) já possuem medidores eletrônicos de energia porém não se comunicam com o Sistema de Controle Centralizado (SCC).

3.4.2 Medidores

Os medidores eletrônicos apresentam inúmeras vantagens em relação aos eletromecânicos, dentre as quais pode-se destacar: maior precisão; interface com o meio externo através de portas de comunicação; medição de várias grandezas elétricas; memorização de dados; oscilografia etc. Abaixo, imagem de medidor eletromecânico e de medidor eletrônico.



Figura 11 – Medidor eletromecânico



Figura 12 – Medidor eletrônico

No Anexo B é apresentada uma descrição das características principais dos medidores ION da Schneider. São medidores compactos amplamente empregados nos sistemas de monitoramento de concessionárias de energia, subestações e consumidores industriais. Suas características abrangem completamente todo o espectro de medições de energia e potência, incluindo funções de monitoramento de qualidade de energia.

4 IMPLEMENTAÇÃO E APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA

4.1 IHM DE MONITORAÇÃO DE DEMANDA DE ENERGIA

A primeira parte deste projeto foi desenvolvida com programas dedicados para fazer a aquisição e o envio dos dados para o microcomputador IHM (Interface Homem Máquina).

No microcomputador IHM, foi utilizado o programa Scilab versão 5.2.1, para efetuar a busca dos arquivos e mostrá-los em tela gráfica, conforme mostra o fluxograma a seguir.

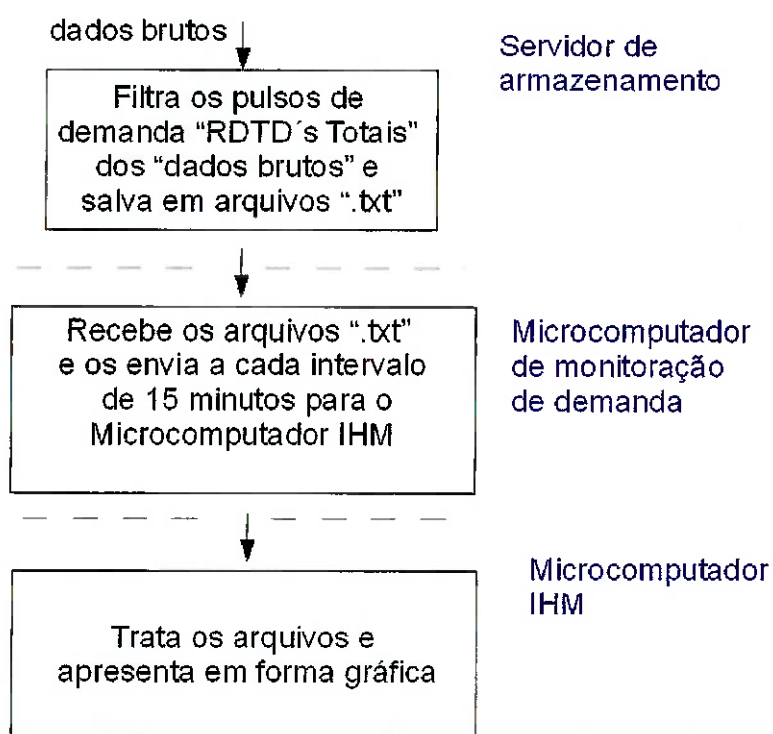


Figura 13 – Fluxograma básico da monitoração de demanda de energia

4.2 MONITORAÇÃO DA ULTRAPASSAGEM DA DEMANDA CONTRATADA DE ENERGIA

A segunda parte do projeto foi desenvolvida com programas dedicados para fazer a aquisição e envio dos pulsos dos “RDTDs parciais” no servidor de armazenamento para o microcomputador de monitoração de demanda.

O programa Scilab versão 5.2.1 utiliza o módulo de rede neural artificial ANN_Toolbox_0[1].4.2.3 para fazer a previsão de ultrapassagem de demanda e informar no “console de energia” com a emissão de alarme, conforme mostra a Figura 14, a seguir:

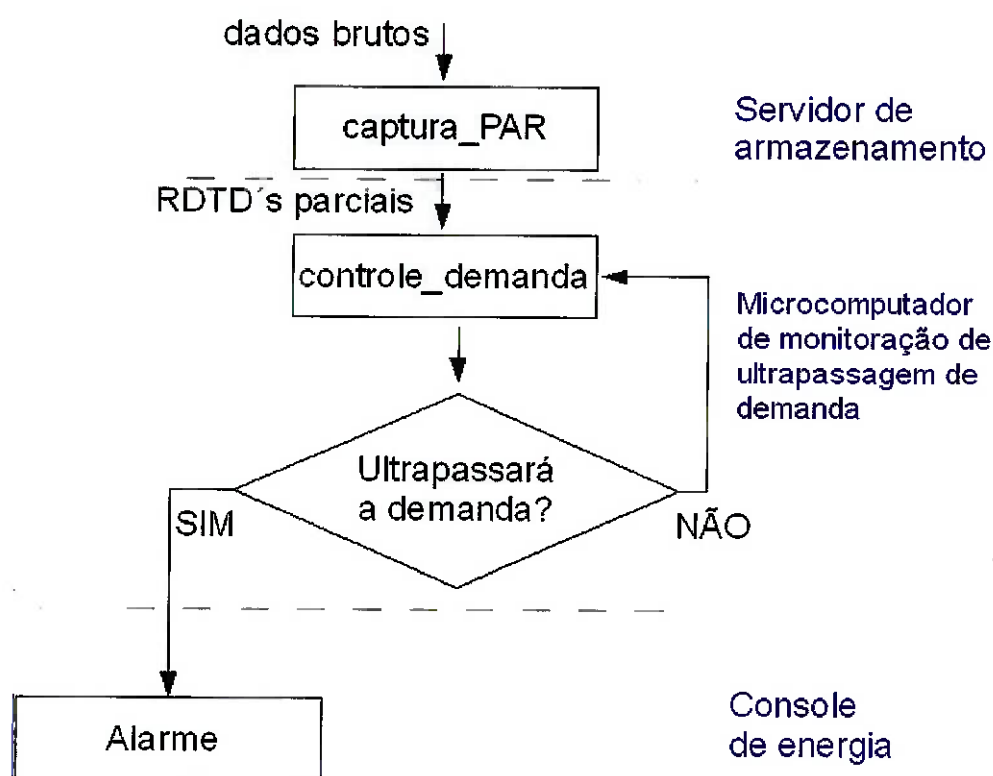


Figura 14 – Fluxograma básico da monitoração de ultrapassagem de demanda de energia

4.3 MONITORAÇÃO DAS SUBESTAÇÕES RETIFICADORAS

As subestações retificadoras do Metrô de São Paulo na maioria ainda não possuem medidores digitais que possam transmitir dados diretamente ao Centro de Controle Operacional (CCO). Na proposta deste trabalho está incluído fazer um estudo para substituir os medidores (eletromecânicos), visto que hoje as medições são feitas manualmente e uma vez por mês.

Os medidores digitais também não se encontram ligados à rede de comunicação com o CCO, impedindo que tais medições possam ser feitas.

A seguir são apresentadas algumas vantagens de efetuar a aquisição dos dados diretamente dos medidores das subestações retificadoras:

- monitoração em tempo real do consumo de energia;
- visualização mais focada do consumo de energia;
- verificação de ajuste dos taps dos transformadores das retificadoras;
- armazenamento dos dados para análise e gerenciamento.

4.4 MONITORAÇÃO DAS SUBESTAÇÕES PRIMÁRIAS

O sistema para este projeto foi inicialmente desenvolvido em um microcomputador administrativo do Metrô, que está aguardando a aquisição de dois microcomputadores com a função de monitorar a ultrapassagem de demanda e o consumo das subestações primárias.

O microcomputador que foi desenvolvido este projeto apresenta as seguintes características:

- PC, Dual CORE, 2 Gigahertz, 160 Gigabytes de Disco rígido
- Sistema operacional Windows XP
- O programa Scilab-5.2.1
- O módulo de rede neural artificial ANN_Toolbox_0[1].4.2.3

A figura 15 mostra a arquitetura final idealizada para o sistema

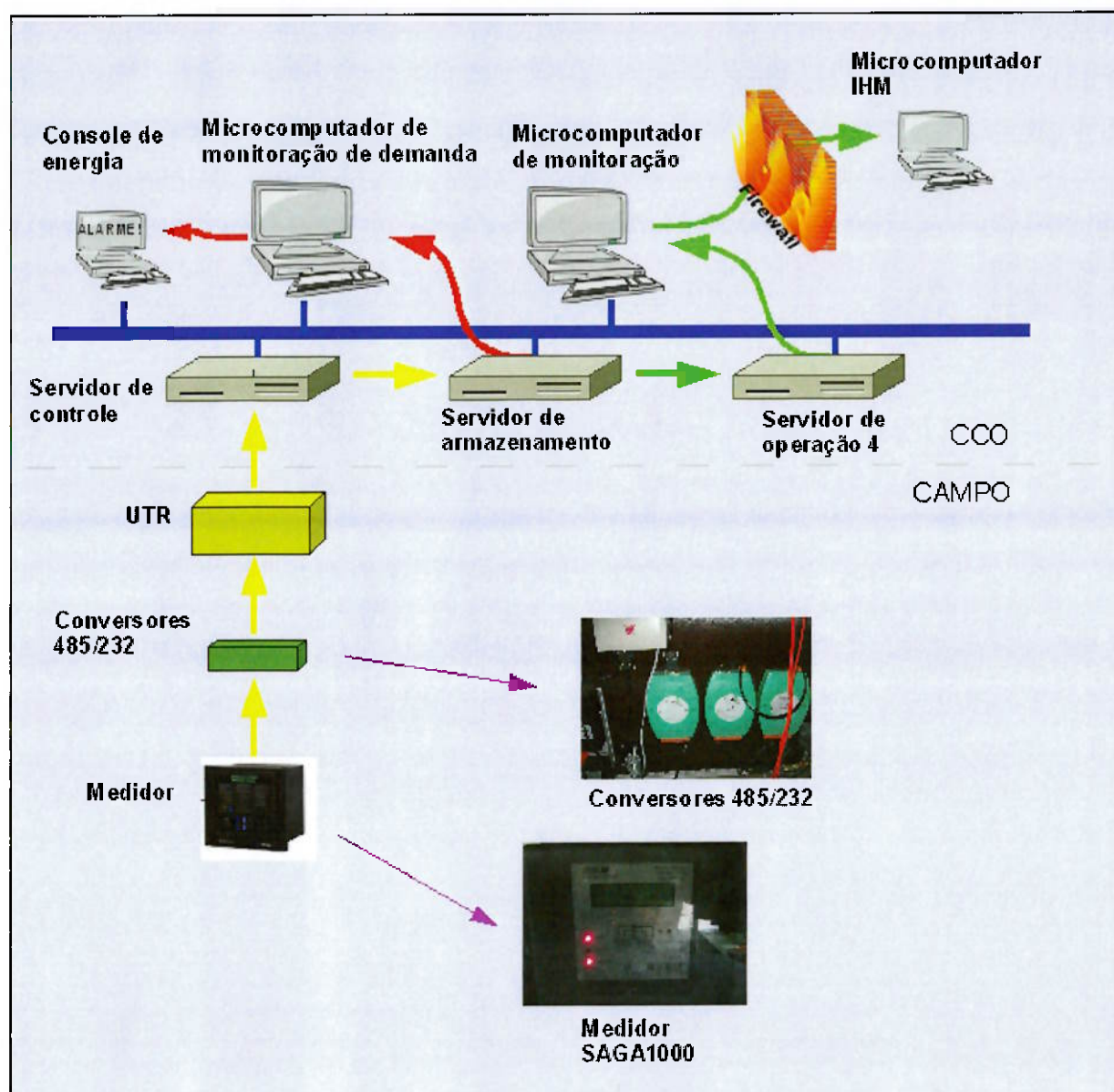


Figura 15 – Arquitetura do sistema de monitoração

4.5 SISTEMA DE MONITORAÇÃO DA DEMANDA DE ENERGIA

O sistema de monitoração é apresentado abaixo na forma de fluxograma

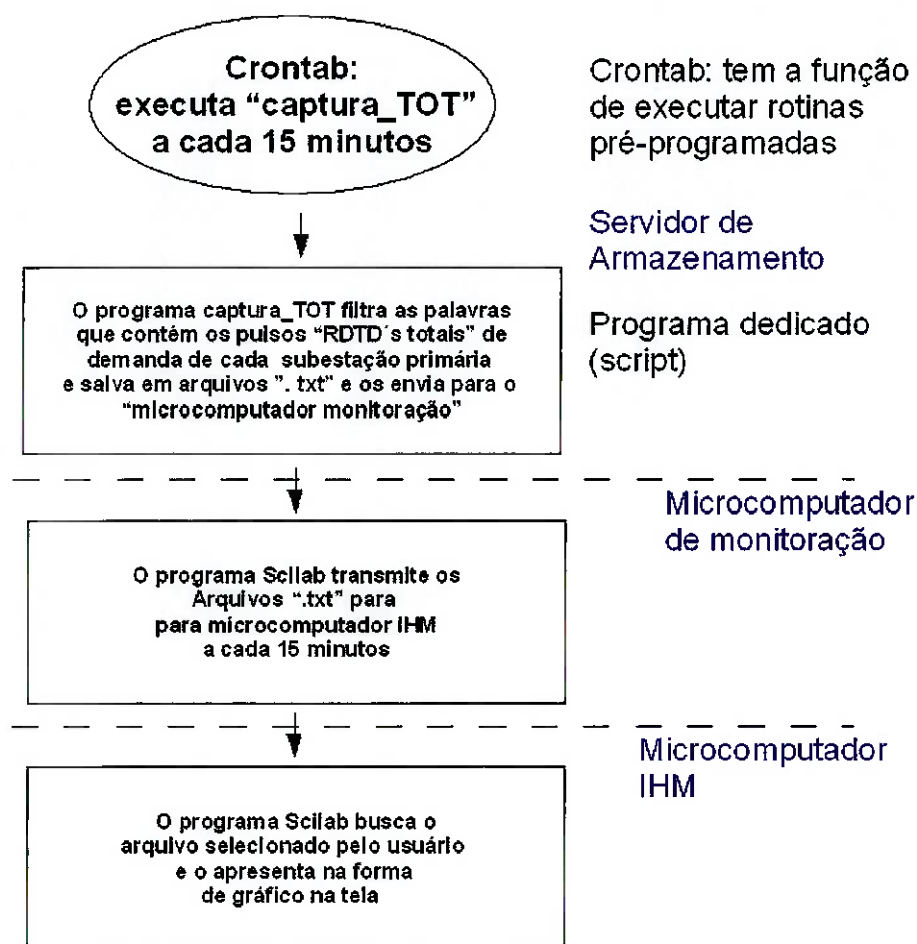


Figura 16 – Programa Captura_TOT

O microcomputador IHM faz a decodificação dos dados e apresentação de uma tela de opções para que o usuário possa selecionar a subestação que deseja.

O programa é executado na inicialização do microcomputador com a habilitação pelo usuário com permissão para acessar o mesmo.

A janela inicial, apresentada a seguir, permite ao usuário selecionar a subestação primária, a linha de energia (se linha 1 ou 2), e a data desejada

O gráfico apresenta a demanda reativa, ativa e a demanda contratada +5%.

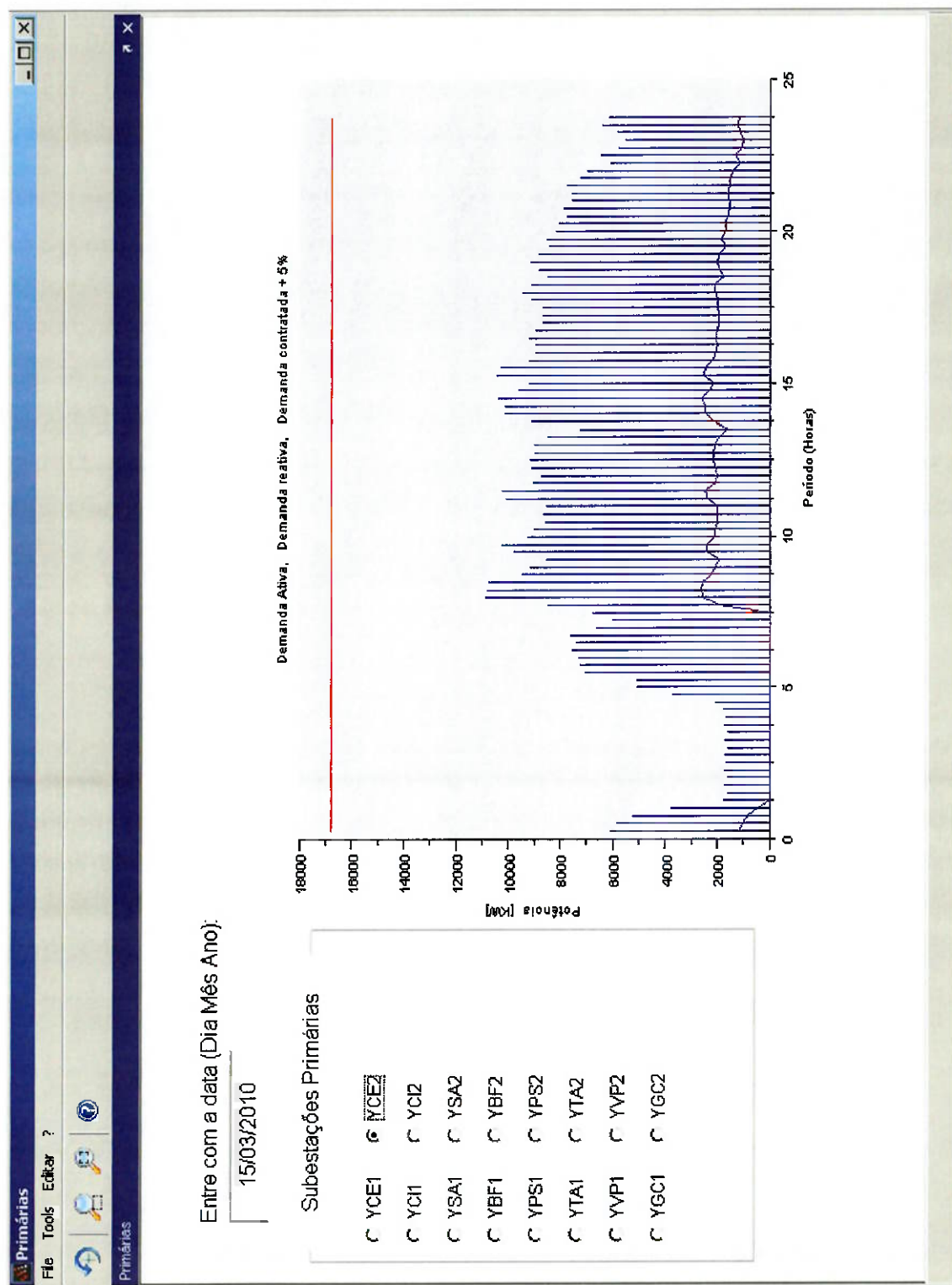


Figura 17 – Tela de consumo de energia do Scilab

4.6 CONSTRUÇÃO DE SISTEMA DE MONITORAÇÃO DE ULTRAPASSAGEM DE DEMANDA

4.6.1 Treinamento da Rede Neural

- Dados de entrada

Para efetuar o treinamento da rede neural foram capturados, nos arquivos históricos “dadosbrutos” do servidor de armazenamento, os pulsos “RDTD,s parciais” da subestação YCI acrescentados em 20% e seu respectivo “horário” nos horários de pico durante cinco (5) dias úteis. O acréscimo se deve ao fato de treinar a rede com os valores próximos da “linha de ultrapassagem de demanda” para simular mais fielmente a situação de ultrapassagem de demanda. Outra observação pertinente é que esta subestação é a que se encontra em estado mais crítico. Optou-se por utilizar uma rede Perceptron de múltiplas camadas com algoritmo de retropropagação.

A topologia da rede:

A camada de entrada contém dois neurônios:

- pulso de “RDTD parcial”;
- horário deste pulso convertido em segundos;

camada oculta: 1 camada com 10 neurônios;

camada de saída: 1 neurônio.

A Figura 18, a seguir, mostra essa topologia.

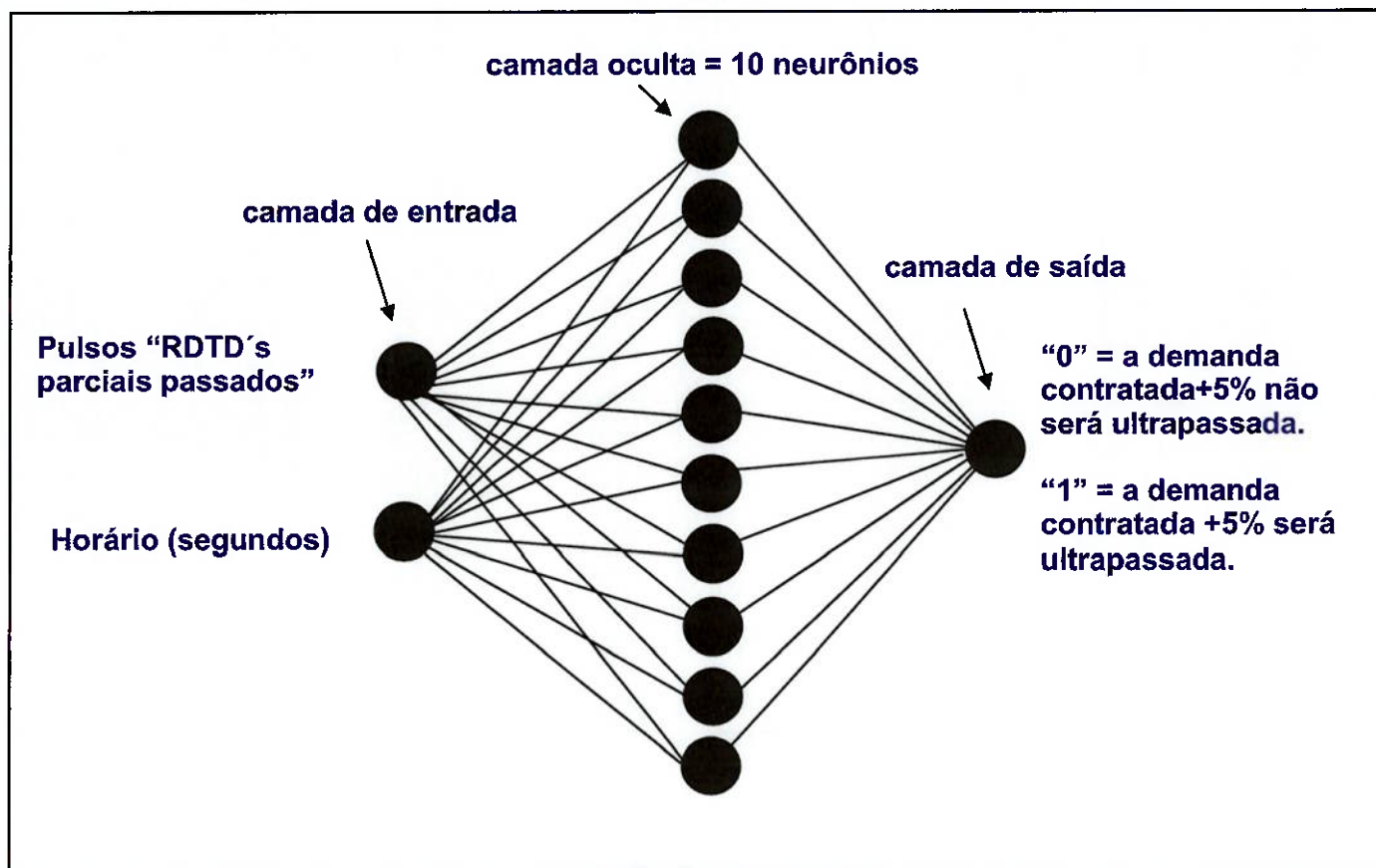


Figura 18 – Topologia da rede

Regras do treinamento:

Uma das verificações constatadas pela qual o algoritmo matemático mostrou-se ineficiente foi devido a este efetuar as previsões baseadas na relação de crescimento de um pulso parcial para o próximo, a cada vinte (20) segundos, pois se obtêm resultados que extrapolam indevidamente o "limite de ultrapassagem de demanda" (figura20) gerando um falso alarme, ou seja, o algoritmo matemático tem uma "visão imediata" e não do "todo", como é a proposta da rede neural.

Por exemplo, se vários trens aceleram ao mesmo tempo aumentando momentaneamente a corrente, conseqüentemente a demanda também se eleva, e isso provocava uma falsa previsão de ultrapassagem da demanda.

A rede neural pode contornar esse problema, pois pelo processo de aprendizagem, ela "saberá" se essa elevação é ou não uma situação momentânea.

Outro problema é que por falta de sincronização os valores dos pulsos “RDTD’s parciais” iniciais também ultrapassam a “linha limite de ultrapassagem de demanda”. Para solucionar o problema, definiu-se que as saídas nos quatro (4) minutos iniciais, aproximadamente treze (13) pulsos “RDTDs parciais”, são considerados “0”, significando que a “demanda contratada +5%” não ultrapassou o “limite de ultrapassagem de demanda”, figura 19.

X1 = “Horário” de recebimento dos pulsos “RDTD’s parciais” convertidos em segundos

X2 = Número de pulsos “RDTDs Parciais”

A saída Y(alvo) será:

“0” se pulso “RDTD parcial” menor ou igual ao “limite de ultrapassagem de demanda”;

“1” se pulso “RDTD parcial” maior que “limite de ultrapassagem de demanda” (salvo a condição de 4 minutos iniciais, em que Y (alvo)=“0”).

A linha “limite de ultrapassagem de demanda”, figura 19, foi obtida a partir da divisão do valor da “demanda contratada + 5%” pelo número de mensagens “RDTD’s parciais” (48 a 50 mensagens) no intervalo de quinze (15) minutos. O valor obtido é somado ao pulso anterior formando essa linha.

Essa linha é a referência utilizada para definir as regras da rede, para o seu treinamento e definição dos “pesos”.

Erros da rede neural:

Após a fase de treinamento, a rede é testada inserindo-se os mesmos valores de entrada, pulsos “RDTDs parciais” e “horário” (segundos) utilizados para o treinamento, para que a rede apresente os novos valores de saída. Assim definir o erro. A rede deve ser configurada, com tentativas, para que estes valores tenham valores o mais próximo possível das saídas impostas(alvo)

Erro parcial = alvo(Y) – previsto(Y0)

O Erro total (E), equivale a soma dos quadrados dos erros parciais.

$$E = \sum (\text{Erro parcial})^2$$

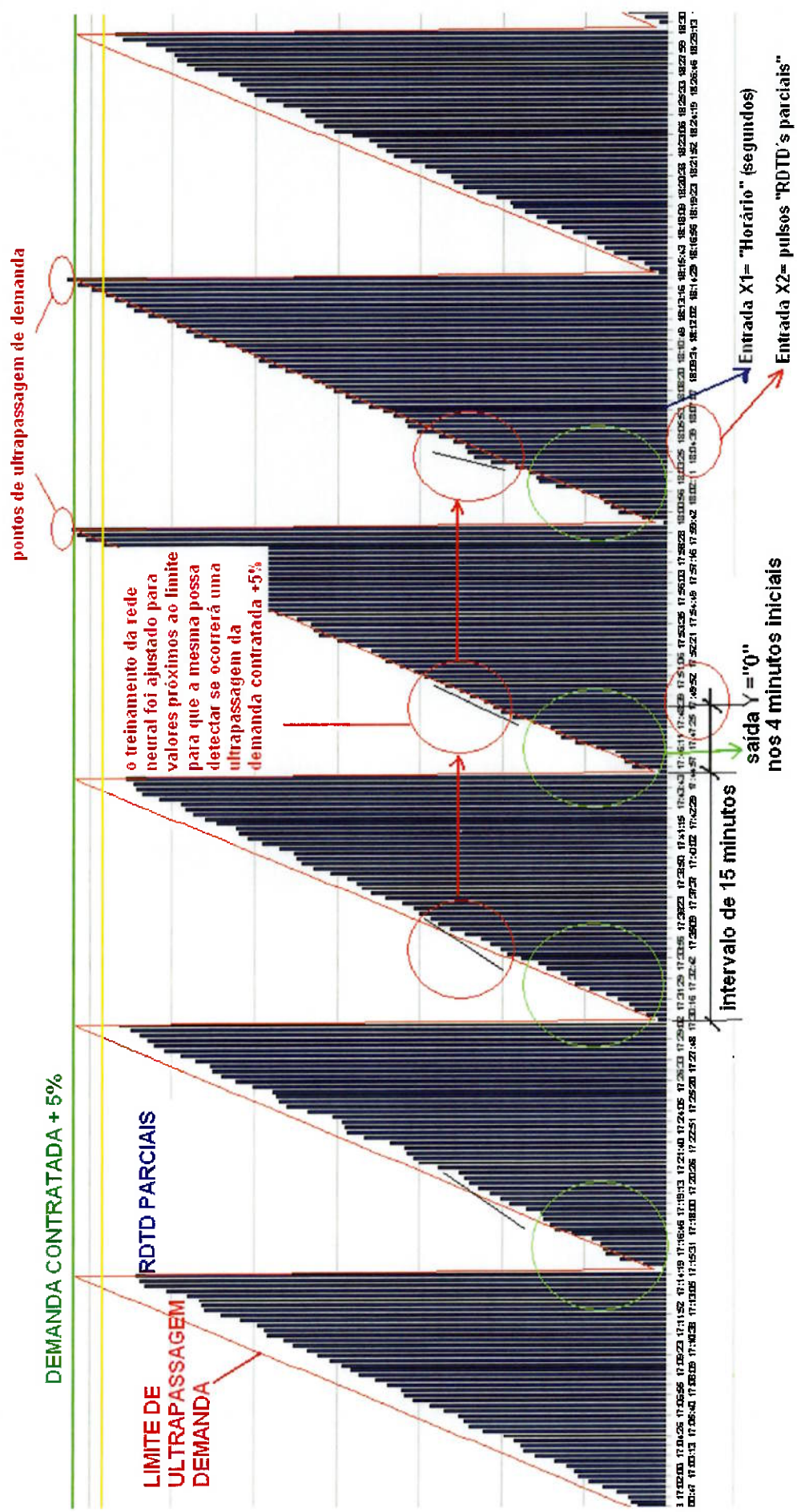
Foram efetuadas várias tentativas para a obtenção da menor Erro total (E) possível.

O valor obtido $E=0,1812$.

Testes com número maior de camadas e neurônios nestas camadas não causam diferença significativa na obtenção do resultado:

Com a inserção de mais camadas ocultas e maior número de neurônios, a rede pode ficar “imprevisível” podendo apresentar valores absurdos. Por segurança, optou-se por utilizar apenas uma camada oculta com baixo número de neurônios.

Outro problema observado é que números elevados de neurônios implicam tempo elevado de processamento do treinamento, cerca de mais de um dia, o que não se justifica, considerando que os erros encontrados estão dentro de uma margem satisfatória, além de que, este projeto ainda se encontra em fase de testes.



A fase de testes foi efetuada com valores de pulsos “RDTDs parciais” teóricos que ultrapassam a demanda contratada. A Figura 20 a seguir mostra uma representação das condições em que os alarmes são gerados para o console de energia.

Cabe observar que nesta fase de testes as condições de alarme apenas foram detectadas, não enviando sinal para o console, o que deverá ocorrer na etapa de testes controlados, na ocasião da implantação dos equipamentos no CCO.

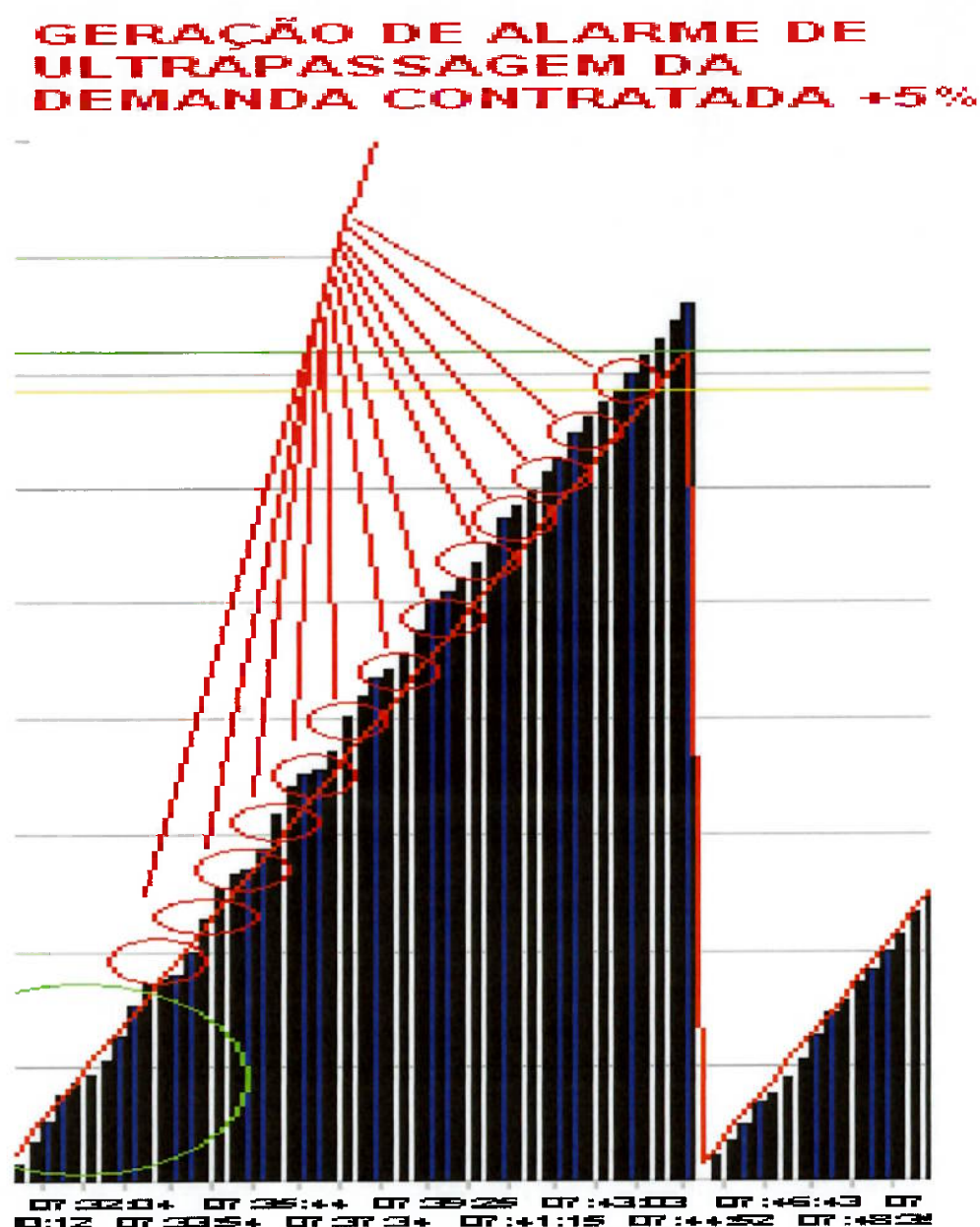


Figura 20 – Geração de alarme de ultrapassagem da demanda contratada + 5%

A figura 21 exemplifica a fase final, em que a rede se encontra funcionando contra o campo. A rede neural detecta e sinaliza previamente se ocorrerá uma ultrapassagem da demanda contratada

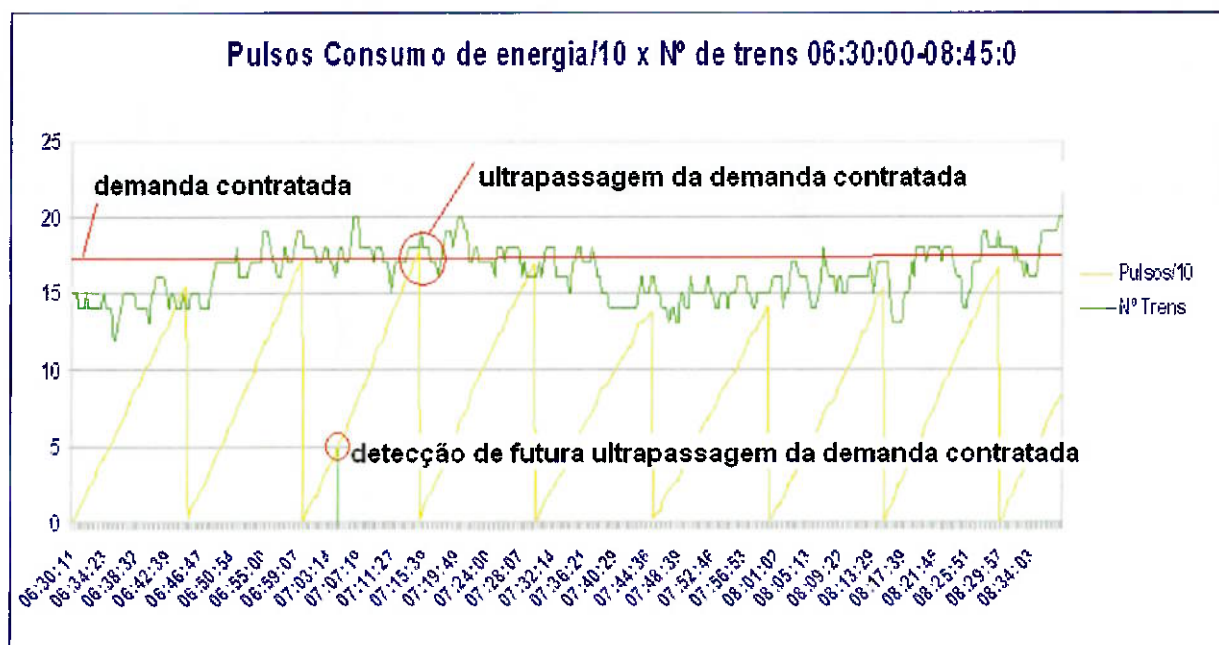


Figura 21 – Resultado gráfico da rede neural

4.7 MONITORAÇÃO DAS SUBESTAÇÕES RETIFICADORAS

4.7.1 Medições

A Figura 22, a seguir, apresenta os medidores de energia na entrada da subestação retificadora e o relé de proteção dos feeders da Subestação Retificadora de Sacomã.

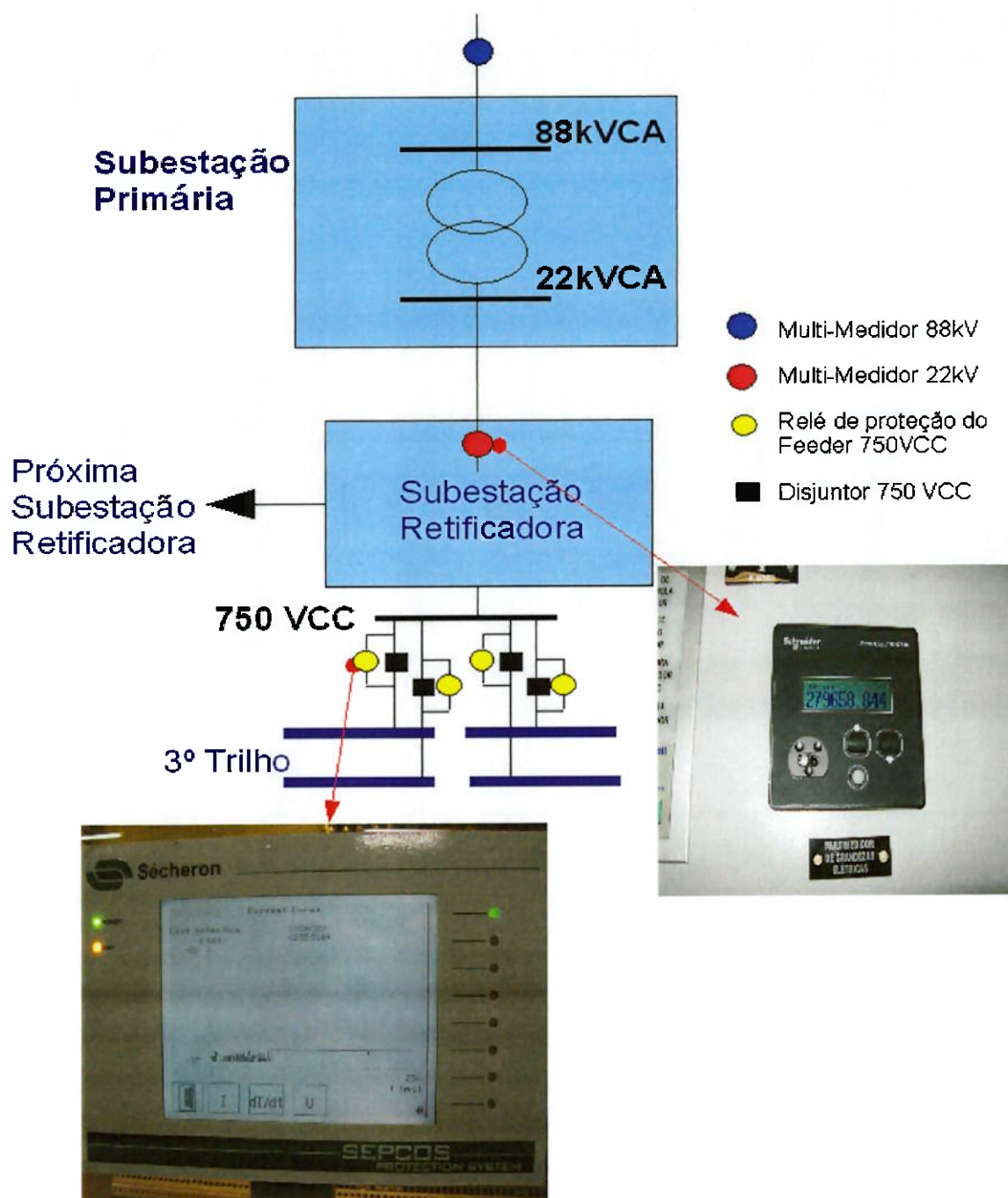


Figura 22 – Subestação retificadora de Sacomã

Foram efetuadas medições nas subestações retificadoras de duas formas:

a) anotando diretamente a potência consumida apontada no mostrador do medidor (Estação Imigrantes), foi possível observar o perfil de carga dos trens, porém com a limitação da varredura em torno de três (3) segundos cada valor em potência em kW em função do tempo (Figura 23)

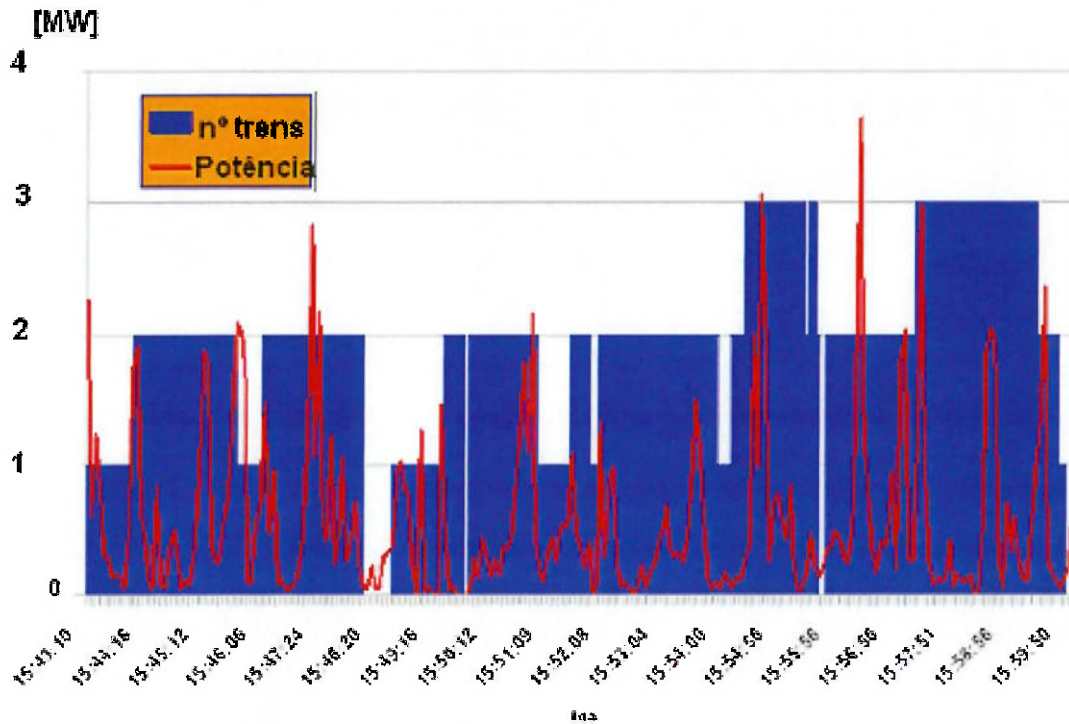


Figura 23 – Medição manual

b) Conectando um microcomputador portátil (Figura 24)



Figura 24 – Monitoração do medidor eletrônico via Ethernet e serial

à porta ethernet e à porta RS 485, constatamos ser possível efetuar a leitura desses medidores pelas mesmas. Também verificamos por esse método que é possível monitorar as grandezas elétricas desses medidores numa varredura muito maior, da ordem de milissegundos. Porém, para este projeto o importante era somente constatar a possibilidade de monitoração remota desses equipamentos.

Os medidores ION contém programas que permitem o gerenciamento remoto das grandezas elétricas dos mesmos, que podem ser baixados pela internet.

4.7.2 Vantagens da Monitoração

A monitoração das subestações retificadoras abre para muitas possibilidades, e existem inúmeros fornecedores de dispositivos e sistemas de gerenciamento de energia no mercado. Podem-se citar algumas vantagens da monitoração:

- gerenciamento do consumo em tempo real, 24 horas por dia;
- medição de consumo e das principais grandezas elétricas em tempo real;
- possibilidade de estudos para projetos de eficiência energética;
- correção do fator de potência e adequação de demanda;
- manutenção preventiva e preditiva;
- supervisão de anomalias elétricas;
- detecção e geração de alarmes imediatamente;
- memória da massa, que armazena o histórico de medição;
- fator de potência instantâneo;
- medição setorial.

4.8 PESQUISA DE PREÇO

Na pesquisa com o fornecedor para implantação dos medidores ION7330, obteve-se valor médio de 6.000 reais por unidade mais custos de implantação, em torno de 1.500 reais, totalizando 7.500 reais.

Comparado com o valor médio de uma subestação retificadora, que é em torno de 7 milhões de reais, o custo do medidor instalado corresponde a, aproximadamente, 0,11 % do valor da mesma.

Já o valor médio de uma subestação primária gira em torno de 30 milhões de reais.

5 SUGESTÃO DE NOVOS ESTUDOS

A modernização do sistema metroviário, com a melhoria da infra-estrutura de rede (STD) e a implantação do bloco móvel (CBTC), propiciará a possibilidade de se obter um grande avanço na área de energia com implantação de um sistema de gerenciamento de energia.

Uma proposta para trabalhos posteriores nesta área é o tema: “Estudo de viabilidade para implantação de um sistema de gerenciamento de energia”, interessante na senda da gestão de custo e perseguição de eficiência energética. O estudo consistiria em um sistema de monitoração e gerenciamento abrangendo os relés de proteção dos “feeders” e também os motores dos trens, propiciando como vantagens principais a manutenção preditiva e o gerenciamento do consumo da energia consumida pelo sistema de tração (Figura 25).

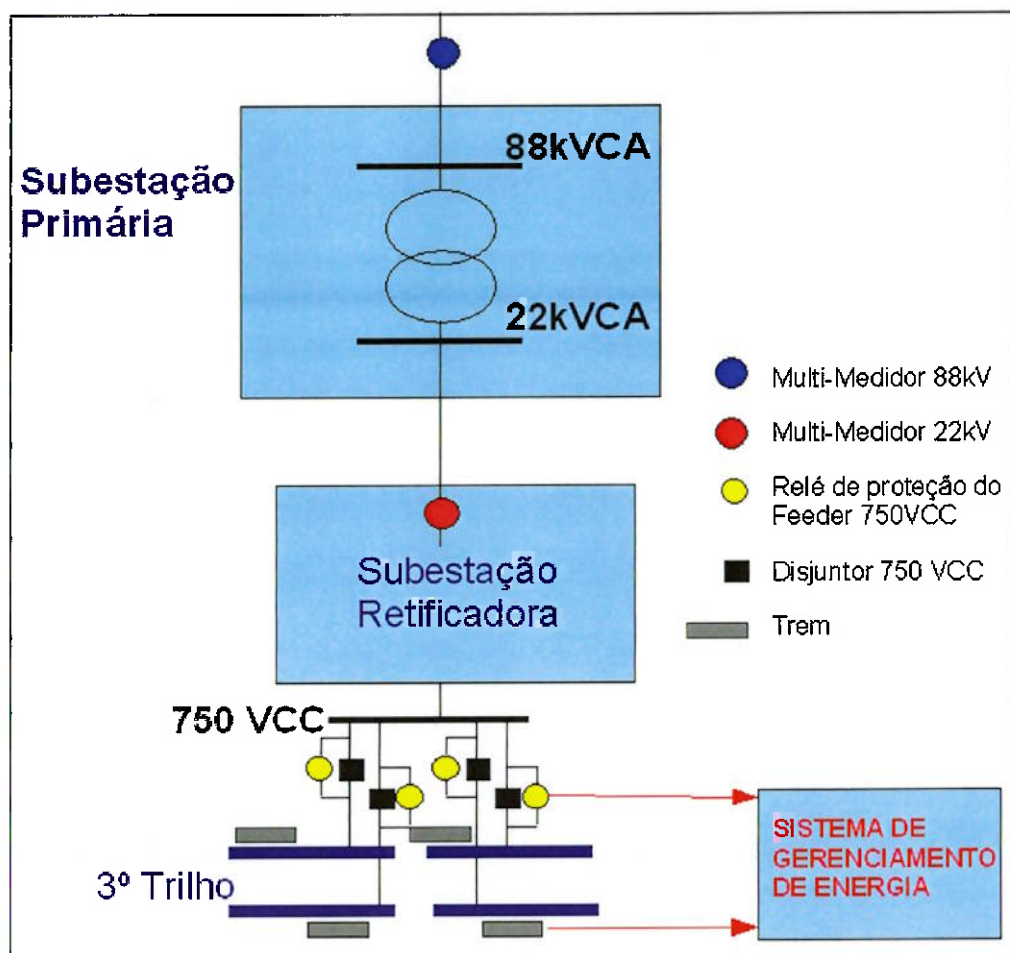


Figura 25 – Sistema de gerenciamento de energia

Cabe salientar que esse estudo baseia-se na realidade próxima que é a rede de comunicação Sistema de Transmissão Digital, STD, onde o sistema de monitoração de energia poderia ser implantado:

O STD é parte do projeto de Modernização dos Sistemas de Sinalização, Telecomunicações e Controle Centralizado das Linhas 1-Azul, 2-Verde e 3-Vermelha da Companhia do Metropolitano de São Paulo. Maiores informações da concepção do sistema se encontram no ANEXO C

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foram estudadas técnicas para a implantação de um sistema de monitoração do consumo de energia e apresentados novos mecanismos, que têm por finalidade, expandir a compreensão do sistema de energia com o fornecimento quantitativo e qualitativo das informações que possam subsidiar decisões para obter maior eficiência no consumo de energia na malha metroferroviária de São Paulo.

Os sistemas de monitoração das subestações primárias e de monitoração da ultrapassagem da demanda foram desenvolvidos a partir da premissa de que fossem de baixo custo e que o Metrô mantivesse o controle tecnológico do sistema, a fim de propiciar a devida autonomia e o desenvolvimento contínuo, aberto a trabalhos futuros. A implantação do sistema de monitoração do consumo de energia das subestações primárias depende da compra dos equipamentos para entrar em operação.

A utilização de redes neurais no sistema de monitoração da ultrapassagem da demanda contratada apresentou resultados satisfatórios, comprovados com medições de campo e do uso do software livre Scilab. A possibilidade de fazer uma previsão que informe o console de controle de energia sobre quanto percentualmente se vai (ou não) ultrapassar a demanda e quanto tempo resta para isso é real e plausível e pode ser visualizada na Figura 26 a seguir.

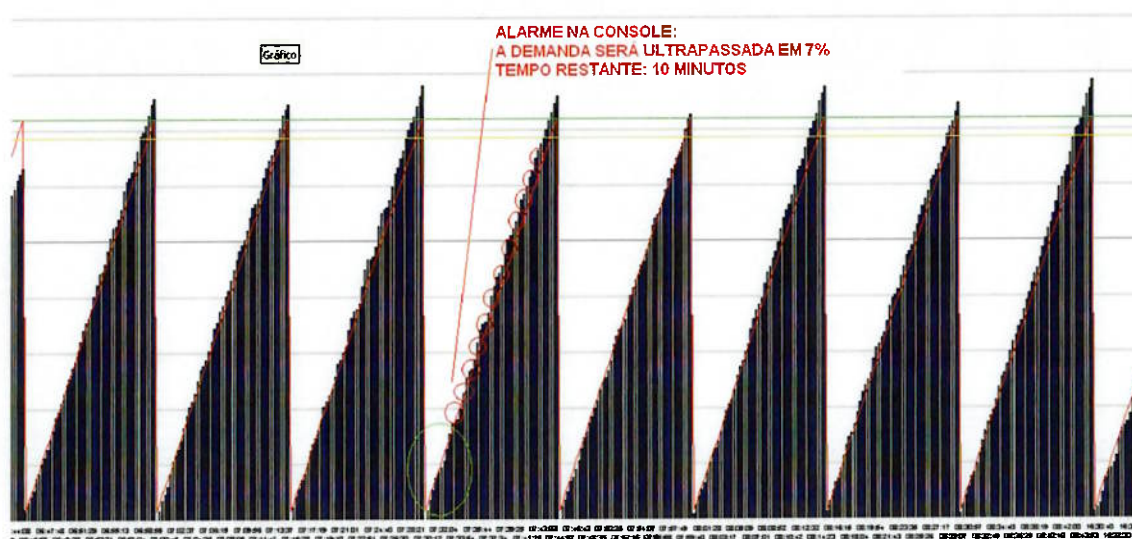


Figura 26 – Demanda versus horário

Também foram efetuados testes com a rede neural tendo como entrada o “número de trens” em vez do “horário”. Hoje não é possível obter com precisão a posição do trem no Sistema de Controle Centralizado. Porém com a modernização do sistema, com o CBTC, os trens passarão a informar com precisão sua localização ao Sistema de Controle Centralizado. Isso implica na melhoria do diagnóstico pela rede neural.

A seguir são apresentados os parâmetros e resultados obtidos da rede neural :

W: peso

X:entradas

Y: alvo

Y0: valor previsto

lp: Parâmetro de aprendizagem

topologia da rede: $N=[2,10,1]$

função de inicialização: ann_FF_init

ex: $W = \text{ann_FF_init}(N);$

função de treinamento para obtenção dos pesos: ann_FF_Mom_online;

ex: $W = \text{ann_FF_Mom_online}(X,Y,N,W,lp,1);$

função para execução para obtenção do valor previsto: ann_FF_run

ex: $Y0 = \text{ann_FF_run}(X, N, W);$

função de definição do Erro: ann_sum_of_sqr

ex: $\text{ann_sum_of_sqr}(Y0, Y)$

tolerância = 0.4

nº de neurônios na camada oculta= 10 ;

nº de épocas de treinamento= 500 ;

aprendizagem= 8;

momentum = 0.7;

$lp = [\text{aprendizagem}, 0, \text{momentum}, 0];$

Testes para verificação do Erro total (E) com dados dos horários de pico de uma semana:

$E = 0,1812$

Testes para verificação do Erro total (E) com horário de pico de um intervalo de 15 minutos com ultrapassagem da demanda:

$E = 0.0028155$

O estudo para a substituição dos medidores obsoletos das subestações retificadoras teve o objetivo alcançado com a medição e levantamento dos equipamentos no campo, pesquisa dos dados técnicos, incluindo visita técnica a fornecedor, e de preços dos dispositivos de medição

Nas medições em campo dos medidores nas entradas das subestações retificadoras foi verificado que é possível obter os mesmos sinais com uma varredura muito maior que no primeiro caso. Efetuamos a leitura dos valores dos medidores com instruções passo a passo sem a varredura. Para isso utilizamos o programa CAS Modbus Scanner v1.02aF (Last Updated: Feb 26 2010) Shareware.

Verificamos que os medidores da família ION possuem um programa de gerenciamento, chamado "ION Enterprise" para monitoração e gerenciamento de energia. (www.powerlogic.com/product.cfm/c_id/16/p-id/30)

REFERÊNCIAS

- ALVAREZ, André Luiz Monteiro. **Uso racional e eficiente de energia elétrica: metodologia para determinação dos potenciais de conservação dos usos finais em instalações de ensino e similares.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 1998. Disponível em <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-17082001-000915/publico/Dissertacao.pdf>>. Acesso em 29.06.2010.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Site: <[HTTP://www.aneel.gov.br/](http://www.aneel.gov.br/)>. Acesso em 25/02/2010
- _____. Resolução 456. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/res2000456.pdf>>. Acesso em 11.04.2010.
- AUSTRÁLIA. Underground Power Programm. Government of Western Australia. Office of Energy. Disponível em <http://www.energy.wa.gov.au/2/3211/64/underground_pow.pm>. Acesso em 18.06.2010.
- BRAGA, F.C.; ARROMBA, M. B.; KESTENER, C.M. **estudo para otimização do sistema de controle de trens em situações de iminente ultrapassagem de demanda elétrica.** Monografia (especialização em Tecnologia MetroFerroviária) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007
- ELETROBRAS. Disponível em <http://www.eletrobras.gov.br/EM_Programas_Procel/default.asp>. Acesso em 28.07.2010.
- FREIMAN, José Paulo; PAMPLONA, Edson de O. Redes neurais artificiais na previsão do valor de commodity do agronegócio. V Encontro Internacional de Finanzas. Santiago, Chile, 19 a 21 de janeiro de 2005. Disponível em <www.encuentrofinanzas.cl>. Acesso em 14.04.2010.
- HARRIS, C. J.. MOORE, C. G & BROWN M.; Intelligent control: Aspects of Fuzzy Logic and Neural Nets; World Scientific, 1993.
- IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY Hydroelectric Power Plant SCADA Systems in Proc 2003
- JARDINI, J.A. Sistemas Digitais para automação da geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Edição Universitária. 1996.
- JARDINI J.A.Artigo_0068_007_2003. 2003.
- KOSKO, Bart. Neural networks and fuzzy systems: a dynamical systems approach to machine intelligence; Prentice-Hall International, 1992.
- LEITE, Mário. SciLab - Uma Abordagem Prática e Didática. Editora Ciência Moderna Ltda, 2009. 606p
- LUDWIG JUNIOR, Oswaldo; MONTGOMERY, Eduard. Redes Neurais – Fundamentos e Aplicações com Programas em C. Editora Ciência Moderna Ltda, 2007. 126P.

MAKHIJA. J. Comparison of protocols used in remote monitoring: DNP 3.0, IEC 60870-5-101 e MODBUS. Seminar Report, Electronics Systems Group, EE Dept, IIT Bombay. Novembro 2003.

METRÔ. Manual da subestação retificadora da linha 1-azul (jab.–san.). MO 103-046 Rev. 00. 2008.

METRÔ DE SANTIAGO. Meio ambiente – eficiência energética. Disponível em <<http://www.metroantiago.cl/medio-ambiente/eficiencia-energetica>>. Acesso em 16.07.2010.

METRÔ DO PORTO. Menos 11.00 carros na cidade. Pesquisa Qmetrics 2008: Avaliação do impacto global da 1ª fase do projecto do Metro do Porto. Disponível em <http://www.metroporto.pt/PageGen.aspx?WMCM_PaginaId=16779¬icialId=20383&pastaNoticiasReqId=15502>. Acesso em 16.07.2010.

NEW YORK POWER AUTHORITY. N.Y. Power Authority and N.Y.C. Transit CEOs unveil solar thermal project at Coney Island train yard. Disponível em <<http://www.nypa.gov/press/2010/100603b.html>>. Acesso em 27.06.2010.

PÁDUA DE BRAGA, Antonio; LURDEMIR, Teresa Bernarda; PONCE, André Carlos. **Redes neurais artificiais, teoria e aplicações**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora-LTC, 2000

PIRES, Paulo S. Motta. Introdução ao Scilab – Versão 3.0. Disponível em <<http://www.rau-tu.unicamp.br/nou-rau/softwarelivre/document/?code=134>>. Acesso em 17.07.2010.

SIQUEIRA R.P.,ONO K.V Protocolos abertos em sistemas de automação de energia: uma análise comparativa entre o DNP3.0, o IEC 60870-5-101 e o novo protocolo IEC 61850. 2007.

THE FUTURES CHANNEL. The New York city subway system. Disponível em <[http://www.thefutureschannel.com/imast/guides_and_other_activities/PDF%20Guide s/5005_new_york_city_subway.pdf](http://www.thefutureschannel.com/imast/guides_and_other_activities/PDF%20Guide%20s/5005_new_york_city_subway.pdf)>. Acesso em 18.06.2010.

TURBUK, Marcio Caetano; GANZAROLLI, Marcela Zanatta. “Conservação de Energia Elétrica Através de Controle de Tráfego” (TURBUK; GANZAROLLI, 1992) apresentado no III Seminário de Operação Metroferroviária (ANTP), em 1992 Biblioteca Metrô

TWENERGY. Metro de Madrid pone en práctica medidas de eficiencia energética. Disponível em <<http://twenergy.com/aprende/medidas-de-eficiencia-en-metro-de-madrid-94>> . Acesso em 22.06.2010.

VILLACORTA, C. J. A. JARDINI and L. C. MAGRINI. Applying Object- Oriented Technology to project. 2003

SCILAB. The free platform for numerical computation. Disponível em <<http://www.scilab.org>>. Acesso em 20.01.2010.

THE MODBUS ORGANIZATION. Disponível em <<http://www.modbus.org>>. Acesso em 05.01.2010.

ANEXO A – MULTIMEDIDOR SAGA1000, Modelo 1681

Produzidos pela Landis+Gyr, têm algumas características técnicas a serem ressaltadas:

- Qualidade de energia: através de monitores de tensão e de carga
- Operação: através de histórico de parametrizações e acessos.
- Diagnóstico para detecção de fraude, através de monitoramento das condições de conexão, limites de operação, sequência de fases e a presença de carga desbalanceada.
- Oscilografia: através do programa de análise de dados da Landis+Gyr PDA, o medidor SAGA 1000 permite observar as formas de ondas instantâneas e analisar os harmônicos das tensões e corrente por fase.
- Comunicação: permite ser parametrizado para fazer ou receber chamadas, através de modems conectados às portas RS232 ou RS485 fornecidas opcionalmente.
- Sincronismo externo: permite o sincronismo dos relógios de unidades conectadas entre si.
- Precisão: classe 0,2 (0,4 para energia reativa).

Características com maiores detalhes podem ser obtidas pelo site:

<<http://Energia/Saga1000.pdf>>

ANEXO B – MULTIMEDIDORES ION

Os medidores ION se destacam pela flexibilidade e conectividade com diferentes protocolos. Os modelos ION7330 e 7350 podem funcionar ainda como gateway e concentrador das informações de outros medidores conectados via rede serial, Ethernet e modem. Disponíveis em três modelos, todos com 4 entradas e 4 saídas digitais para controle e monitoramento.

- ION7330: amostragem de 32 amostras/ciclo, 2 portas RS485, memória de 300 kBytes, alarmes e harmônicas até 15ª;

Aplicações:

- Gerenciamento de custos
- Estudo de cargas e otimização do sistema elétrico
- Controle de demanda e fator de potência
- Automação de pequenas subestações
- Monitoramento da qualidade de energia (ION7350)
- Medição de energia elétrica
- Rateio / alocação de custos

Maiores informações: <<http://global.powerlogic.com/support/ION7330/>>

Na tabela a seguir é possível verificar que o medidor ION7350 oferece o recurso de oscilografia, permitindo a visualização do perfil de carga do trem quando trafegando no domínio dessa subestação.

Características dos medidores eletrônicos ION

Guia de escolha				
Geral		ION7300	ION7330	ION7350
Uso em sistemas BT e AT		■	■	■
Precisão de corrente e tensão		0,25% ⁽¹⁾	0,25% ⁽¹⁾	0,25% ⁽¹⁾
Precisão de corrente e potencia		0,5% ⁽²⁾	0,5% ⁽²⁾	0,5% ⁽²⁾
Taxa máxima de amostras por ciclo		32	32	64
Valores RMS instantâneos				
Corrente, tensão e frequência		■	■	■
Potências ativa, reativa e Total e por fase aparente		■	■	■
Fator de potência - Total e por fase		■	■	■
Valores de energia				
Energia bidirecional, total, gerada consumida e líquida		■	■	■
Modo de acumulação ajustável		■	■	■
Valores da demanda				
Corrente	Janela e valores máximos	■	■	■
Potências ativa, reativa e aparente	Janela e valores máximos	■	■	■
Potências ativa, reativa e aparente previstas		■	■	■
sincronização da janela de medição		■	■	■
Ajuste do método de cálculo	Janela fixa, móvel, térmica	■	■	■
Medição da qualidade da energia				
Distorção harmônica	Corrente e tensão	■	■	■
Harmônicas individuais		15	15	31
Captura de formas de onda		-	-	■
Detecção de quedas e oscilações na tensão		-	-	■
Funções lógicas e matemáticas programáveis		-	■	■
Armazenamento de dados				
Registro de mín/máx para qualquer parâmetro		-	■	■
Registro de eventos		-	■	■
Resolução da estampa de tempo em segundos		-	0,001	0,001
Alarmes		-	■	■
Descagem automatica em caso de alarme		-	■	■
Capacidade de memória interna		-	300Kb	300Kb
Display e Entradas/Saídas				
Display LCD integrado ou remoto		■	■	■
4 Entradas digitais		-	■	■
4 Saídas digitais		■	■	■
4 Entradas analógicas e 4 saídas analógicas		-	Opcional	
Comunicação				
Porta configurável RS232/RS485		1	2	2
Porta RS 485		1	1	1
Porta Frontal (infravermelho)		1	1	1
Porta ethernet, gateway ethernet e servidor HTML		-	Opcional	
Modem interno, tranferência de dados RS485 e modem		-	Opcional	
Protocolos: modbus, DNP3.0 e ION		■	■	■
Opção de gateway entre ethernet ou modem porta serial		-	■	■
Protocolos: Modbus RTU, Modbus TCP, DNP3.0 e ION		■	■	■
Porta de comunicação Profibus		Opcional	-	-

(1) precisão de 0,4% para entradas de corrente I4 e I5.

(2) Precisão de 1,5% para potência e energia reativas; 1% para energia aparente e 0,5% para energia e potência ativas

ANEXO C – Sistema de Transmissão Digital STD

O Sistema de Transmissão Digital consiste na infra-estrutura de comunicação para fornecimento de serviços de transmissão de voz, dados e imagem a todos os sistemas usuários nas estações, subestações, retificadoras, CCO, vias, poços de ventilação, saídas de emergência, bases de manutenção e pátios. São considerados sistemas usuários do STD:

- 1- SCMVD – Sistema de Comunicações Móveis de Voz e Dados;
- 2- VHF – Sistema de Radio Comunicação;
- 3- SMM – Sistema Multimídia;
- 4- SME – Sistema de Monitoração Eletrônica;
- 5- SCF – Sistema de Comunicações Fixas;
- 6- SCA – Sistema de Controle de Acesso;
- 7- Sistema de Bilhete Único;
- 8- SIG – Signalling
- 9- ATS – Automatic Train Control;
- 10- SCP – Sistema de Controle do Pátio;
- 11- Sistema de Portas de Plataforma;
- 12- Sistema Colaborativo;
- 13- Sistema de Informática Administrativa;
- 14- Sistema de Aplicações Comerciais;
- 15- Rede Local;
- 16- Sistema de Gerenciamento de Manutenção;
- 17- MSS;

O STD deve fornecer os cabos de fibra óptica, cabos de rede e a infra-estrutura necessária para as redes convergentes, redes locais e rede óptica, incluindo conectores, acessórios, gabinetes de telecomunicações e DGOs nas estações das linhas 1, 2 e 3, pátios, CCO, postos de manutenção, retificadores, poços de ventilação e saídas de emergência, assim como todos os equipamentos necessários para a conexão dessas redes ao CCO

Não faz parte do escopo do STD fornecer cabos, conectores, acessórios e infra-estrutura para interconectar os equipamentos dos sistemas usuários nos DGOs e gabinetes de telecomunicações, essa infra-estrutura é parte do fornecimento dos sistemas usuários.

O STD deve prover um sistema de gerenciamento completo para as redes implementadas nas Linhas 1, 2 e 3, CCO e pátios e deve fornecer 3 IHM's para gerenciamento.