

ASPECTOS RELEVANTES E CONFIGURAÇÃO DA REDE TIPO BARRAMENTO DE CAMPO PADRÃO WORLDIFIP APLICADA AO SISTEMA DE SUPERVISÃO E CONTROLE DE UMA PLANTA GERADORA DE ENERGIA ELÉTRICA

JOSÉ LUIZ PEREIRA DOS SANTOS*, RÔMULO SILVA DE OLIVEIRA†

* *Itaipu Binacional*
Usina Hidrelétrica de Itaipu
Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil

† *Universidade Federal de Santa Catarina*
Departamento de Automação e Sistemas
Florianópolis, Santa Catarina, Brasil

Email: jlps@itaipu.gov.br, romulo@das.ufsc.br.

Abstract— This article presents a conceptual model for an electrical power generating plant supervision and control system supported by distributed computing environment. It also defines a mathematical methodology for the analysis of the variables exchange scheduling of an application that uses the WorldFIP protocol as the level 1 standard fieldbus of the system conceptual model.

Resumo— Este trabalho apresenta um modelo conceitual para o sistema de supervisão e controle de uma planta geradora de energia elétrica suportado por ambiente computacional distribuído. Adicionalmente define uma metodologia matemática de análise do escalonamento das transações de variáveis de uma aplicação que emprega o protocolo WorldFIP como padrão de rede de campo do nível 1 do modelo conceitual.

Key Words— Supervisão e Controle de Processos, Sistemas de Tempo Real, Redes Industriais, Sistemas Computacionais Distribuídos, Barramento de Campo, *fieldbus*, WorldFIP

1 Introdução

1.1 Modelo Conceitual de um Sistema de Supervisão e Controle de Processos Industriais

Os sistemas de supervisão e controle de processos industriais suportados por ambiente computacional distribuído podem ser modelados com base nos conceitos da arquitetura CIM (*computer integrated manufacturing*) (McGuffin et al., 1988). Na estrutura mostrada na Fig. 1 cada atividade da cadeia de produção de energia elétrica é mapeada a um nível hierárquico. O nível mais elevado relaciona-se com a gerência da planta, caracterizada por altos níveis de responsabilidade administrativa, por tarefas com tempos de resposta relativamente longos e restrições temporais menos rigorosas. O nível 0 (zero) representa a interface com o processo, realizada pelos dispositivos de entrada e saída, denominados sensores e atuadores.

À medida que as atividades aproximam-se dos níveis mais baixos da hierarquia aumentam o rigor das restrições temporais das tarefas computacionais e a demanda por tempos de resposta mais curtos. Portanto os intercâmbios de informações nos níveis 0 e 1 devem ser implementados através de suportes de comunicação com resposta temporal determinista, de modo a garantir o atendimento das restrições temporais das tarefas e a preservar as consistências espacial e temporal dos dados.

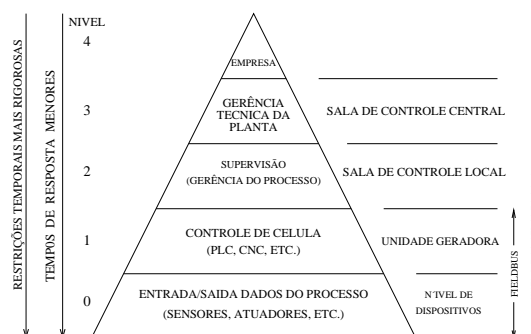


Figura 1: Modelo Conceitual do Sistema de Controle do Processo de Produção de Energia Elétrica

A Fig. 2 representa, de forma simplificada, a arquitetura de *hardware* do sistema de supervisão e controle local de uma planta hidrogeradora de energia elétrica. A topologia adotada possibilita o mapeamento das redes do processo aos níveis hierárquicos definidos no modelo conceitual do sistema (Fig. 1).

No nível 2 localizam-se as estações de operação empregadas para supervisão e controle local das células produtivas da planta que, neste caso, são as unidades geradoras. Encontram-se também neste nível os demais componentes de suporte à operação e às atividades de engenharia e o elemento de ligação (*gateway*) com o nível supe-

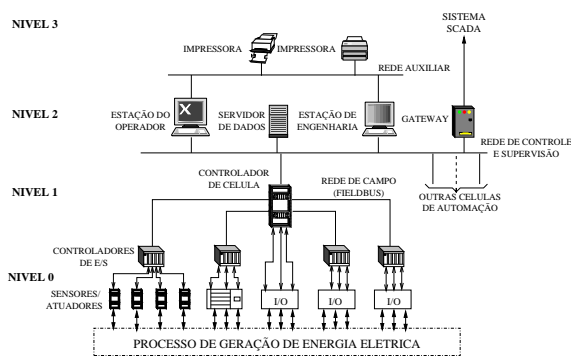


Figura 2: Sistema de Supervisão e Controle Local de Uma Planta Geradora de Energia Elétrica

rior, exercido pelo sistema de supervisão, controle e aquisição de dados da planta (SCADA).

A tendência de emprego do protocolo WorldFIP (WorldFIP, 1988) em plantas de geração de energia elétrica no Brasil motivou a investigação de um modelo matemático aplicável a sistemas que adotem este padrão de rede industrial.

O objetivo deste trabalho é apresentar uma metodologia de configuração da rede WorldFIP tendo como exemplo de aplicação o Sistema Digital de Supervisão e Controle Local (SDSC) das duas unidades hidrogeradoras de 700MW que estão sendo adquiridas pela Itaipu Binacional (Itaipu, 1998), empregando a disciplina taxa monotônica (RM - *rate monotonic*) para escalonamento do tráfego das variáveis periódicas.

2 Uma Breve Descrição do Protocolo WorldFIP

WorldFIP é um protocolo de rede industrial do tipo barramento de campo (*fieldbus*), desenvolvido para servir como meio de ligação física entre os componentes do nível 0 (sensores e atuadores) e entre estes e o nível 1 (controladores, PLCs, etc.) em sistemas de automação.

O protocolo WorldFIP é implementado em três camadas do modelo de referência OSI (física, enlace de dados e aplicação), disponível em três taxas de transmissão de dados, quando empregado com pares trançados de cobre: S1 (31,25 kb/s), S2 (1,0 Mb/s) e S3 (2,5 Mb/s). A utilização de fibra ótica permite a elevação da banda de transmissão para 5 Mb/s.

O padrão WorldFIP é dotado de certas características que o qualificam para aplicações distribuídas que contenham tarefas de tempo real críticas, destacando-se o suporte para sistemas redundantes, a garantia de tempo de resposta (determinismo), taxas de transmissão elevadas (considerando-se as redes industriais), aplicabilidade a diversas topologias de rede e elevada con-

fiabilidade (Vasques e Juanole, 1994).

O protocolo WorldFIP provê dois tipos de serviços de comunicação, disponibilizados pela camada de enlace de dados: *transações de variáveis identificadas* e *transferências de mensagens*. As transações de variáveis identificadas são empregadas para suporte das tarefas de tempo-real críticas. As transferências de mensagens suportam um subconjunto do padrão MMS (*Manufacturing Messaging Specification*) e não serão consideradas neste trabalho.

As transações de variáveis identificadas podem ser periódicas ou aperiódicas. As transações periódicas têm prioridade mais alta e são realizadas automaticamente pelo sistema de comunicação. As transações aperiódicas ocorrem em resposta a demandas dinâmicas utilizando os serviços da camada de aplicação e dispõem de dois níveis de prioridade: *urgente* e *normal*. Para cada nível de prioridade existe uma fila do tipo FCFS (*first come first served*).

2.1 Controle de Acesso ao Meio

O controle de acesso ao meio (MAC) do padrão WorldFIP é baseado no modelo produtor-distribuidor-consumidor (PDC) (Tovar e Vasques, 1999). Neste modelo uma estação configurada como *árbitro de barramento* inicia todas as transações através da difusão (*broadcasting*) de um quadro contendo um determinado identificador. A estação que produz a variável associada ao identificador (*produtor*) responde à requisição transmitindo um quadro com o valor solicitado. Simultaneamente as estações que dependem da variável produzida (*consumidores*) copiam, em *buffers* locais, o dado contido no quadro transmitido pelo produtor.

Em cada estação subscritora de uma rede WorldFIP a camada de enlace gerencia um conjunto de *buffers* onde são armazenados os valores das variáveis. Estes *buffers* são disponíveis para as tarefas locais através dos serviços da camada de aplicação, que efetua a escrita ou a leitura de tais *buffers*. Os conteúdos dos *buffers* das estações consumidoras podem também ser atualizados pela rede através do serviço denominado *transferência de buffer*.

2.2 Escalonamento das Transações

As transações periódicas são realizadas com base em uma tabela de escalonamento estática, configurada em tempo de projeto (*off-line*), cujas entradas são varridas pelo árbitro de barramento em tempo de execução. Esta tabela é organizada como uma lista de ciclos elementares consistindo de janelas de tempo com as identificações das

variáveis que deverão ser processadas seqüencialmente. O padrão de tráfego cíclico resultante da natureza periódica das transações tem um período igual ao mínimo múltiplo comum (MMC) dos períodos das variáveis e denomina-se *macro-ciclo*. A Fig. (3) exemplifica uma tabela de árbitro de barramento contendo três variáveis A, B e C, com períodos de 1, 2 e 3 ms, respectivamente.

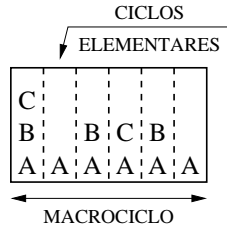


Figura 3: Tabela do Árbitro de Barramento

A rede WorldFIP tem diversos modos de operação, no que concerne à sincronização dos ciclos elementares e dos macro-ciclos. Neste trabalho será considerado o modo síncrono, caracterizado pela duração constante dos ciclos elementares.

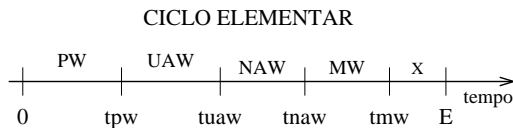


Figura 4: Ciclo Elementar Contendo Transações Periódicas e Aperiódicas

A Fig. 4 representa um ciclo elementar de duração E , contendo uma fase síncrona, denominada janela periódica (PW), três fases assíncronas consecutivas identificadas como janelas aperiódicas urgente e normal (UAW , NAW) e a janela de mensagens aperiódicas (MW). Estas quatro janelas têm prioridades decrescentes, ou seja, as transações em uma janela ocorrem somente depois da conclusão das transações da janela precedente, e se o tempo restante até o final da janela respectiva o for suficiente. As transações deverão obedecer os limites das janelas, satisfazendo à condição: $t_{pw} \leq t_{uaw} \leq t_{naw} \leq t_{mw} \leq E$.

No caso de $t_{mw} < E$ uma quinta janela (X) aparecerá no fim do ciclo. Esta janela não será usada para transmitir informações. Em vez disso a camada de enlace a completará com dados de preenchimento (*padding*).

2.3 Transferências Periódicas

Cada transferência de *buffer* corresponde a uma transação básica, iniciada através da difusão, pelo árbitro de barramento, de um quadro de pergunta (ID_DAT) contendo o identificador de

uma variável, seguido de um quadro de resposta (RP_DAT) enviado pela estação produtora da variável, com o respectivo valor atualizado (Fig. 5).

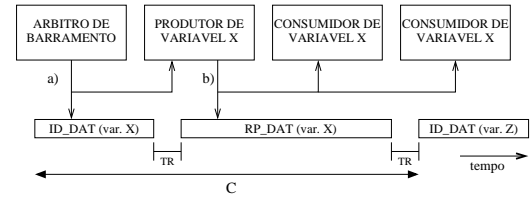


Figura 5: Transações Periódicas

A duração da transação da variável X , por exemplo, pode ser avaliada usando-se a expressão (1) na qual tx_rate representa a banda de transmissão da rede em Mb/s, $len()$ é a largura do quadro (em número de bits) e t_r é o tempo de circulação (*turnaround time*) em microssegundos.

$$C = \frac{len(ID_DAT) + len(RP_DAT)}{tx_rate} + 2.t_r \quad (1)$$

Cada quadro ID_DAT tem uma largura fixa de 64 bits. O quadro RP_DAT tem largura variável, correspondendo a 48 bits mais os bits de dados da resposta. O padrão WorldFIP estabelece, para valor do tempo de circulação, um intervalo de 10 a $70 t_{mac}$, onde t_{mac} é a duração da transmissão de um símbolo físico (um bit).

2.4 Transferências Aperiódicas

As transferências aperiódicas de *buffers* são efetuadas através do mecanismo ilustrado pela Fig. 6. Em cada ciclo elementar (Fig. 4), após ser concluído o tráfego periódico, o árbitro de barramento comanda o processamento das transações aperiódicas obedecendo às prioridades das variáveis. A transferência de uma lista de variáveis aperiódicas consiste de uma série de transações atômicas (quadro ID / quadro RP) processadas nas janelas aperiódicas de um ou de vários ciclos elementares consecutivos. (Tovar e Vasques, 1999) apresentam uma metodologia de cálculo do tempo de resposta de pior caso para uma requisição de transferência aperiódica de uma estação k , resumida como:

$$Ra^k = \sigma^k + len_abi \quad (2)$$

onde σ^k é o limite superior do intervalo morto, que depende do tráfego periódico, e len_abi representa o tempo de processamento de todas as requisições aperiódicas que estejam pendentes de transmissão na fila do árbitro do barramento.

2.5 Eficiência da Rede

A eficiência da rede WorldFIP (η) é definida como a razão entre o tempo de transmissão da "infor-

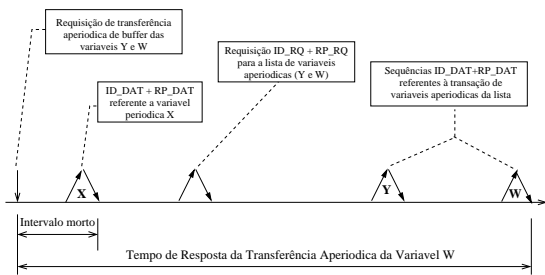


Figura 6: Processamento de uma Requisição Aperiódica

mação útil” e o tempo total da transação, calculado pela expressão (3):

$$\eta = \frac{8 \times n \times t_{mac}}{(8 \times n + 112) \times t_{mac} + 2t_r} \quad (3)$$

onde n é a largura do dado em *bytes*. Por exemplo, uma rede com banda de 2,5 Mb/s e $t_r = 10\mu s$, terá a eficiência de 16,49% se as variáveis tiverem largura de 4 *bytes*. Neste caso a taxa de transferência líquida (*throughput*) será 412,37 kb/s.

3 A Aplicação - SDSC

Esta seção trata da configuração da rede WorldFIP localizada no nível 1 do sistema de supervisão e controle local das duas novas unidades hidrogeradoras da Itaipu Binacional. O SDSC implementará as lógicas de controle das operações de partida, sincronização, tomada de carga, regulação de velocidade, controle de potência, controle de tensão, paradas normal e de emergência e gerência de alarmes, para citar as mais importantes, no contexto de sistemas de tempo real.

3.1 Topologia dos Dispositivos do Nível 1

A Fig. 7 mostra a topologia dos controladores de entrada e saída interligados através da rede WorldFIP. Estes dispositivos formam a camada de interface com o processo.

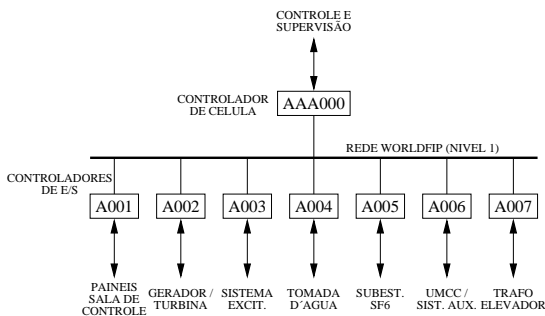


Figura 7: Dispositivos do Nível 1

Os sinais indicativos de estado dos equipamentos (*on-off*) são codificados em 1 bit e designados na Tabela 1 como *sinais binários*.

| Estação | Sinais Binários | | |
|---------|-----------------|--------|-------------|
| | Controle | Alarme | Sinalização |
| AAA000 | 125 | - | - |
| A001 | 20 | 170 | 16 |
| A002 | 82 | 106 | 86 |
| A003 | 14 | 45 | 14 |
| A004 | 5 | 22 | 9 |
| A005 | 27 | 18 | 30 |
| A006 | 10 | 18 | 9 |
| A007 | 5 | 71 | 20 |
| Total | 288 | 450 | 184 |

Tabela 1: Quantificação dos Sinais Binários

Os sinais de natureza contínua, denominados *sinais analógicos*, estão resumidos na Tabela 2, separados em quatro grupos: *set-point*, TC/TP (transformadores de corrente/transformadores de potencial), transdutores e RTD (sensores de temperatura). Estes sinais são codificados em 14 bits.

| Estação | Grupos dos Sinais Analógicos | | | |
|---------|------------------------------|-------|------------|-----|
| | Set-Point | TC/TP | Transdutor | RTD |
| AAA000 | 12 | - | - | - |
| A001 | - | - | - | - |
| A002 | - | 3 | 26 | 32 |
| A003 | - | - | 6 | - |
| A004 | - | - | - | - |
| A005 | - | - | - | - |
| A006 | - | - | 7 | - |
| A007 | - | - | 9 | - |
| Total | 12 | 3 | 48 | 32 |

Tabela 2: Quantificação dos Sinais Analógicos

3.2 Critérios de Formação das Variáveis

As variáveis foram classificadas, para fins de atribuição das prioridades de acesso ao meio de transmissão, em quatro conjuntos: controle, alarme, sinalização e sinais analógicos.

Considerando-se a distribuição dos sinais pelas estações, as características dos condicionadores de sinais e a eficiência da utilização da rede (ver subseção 2.5) todas as variáveis serão estruturadas como cadeias (*strings*) de 32 bits.

Variáveis Periódicas

O modelo matemático das variáveis periódicas (vp_i) considera dois parâmetros: a duração da

transação (Cp_i), calculada pela expressão (1), e seu período, T_i . Na expressão (4) np representa o número de variáveis periódicas.

$$vp_i = (Cp_i, T_i), i = 1 \dots np \quad (4)$$

A Tabela 3 mostra as variáveis periódicas classificadas com base em seus períodos, em função dos tempos de resposta exigidos pelo processo.

| Natureza | Variáveis Periódicas | |
|------------|----------------------|--------------|
| | Conjunto | Período (ms) |
| Controle | p1 | 10 |
| TP/TC | p2 | 20 |
| Transdutor | p3 | 60 |
| RTD | p4 | 300 |

Tabela 3: Conjuntos de Variáveis Periódicas

A distribuição dos conjuntos das variáveis periódicas produzidas pelas estações subscritoras da rede está detalhada na Tabela 4.

| Estação | Conjuntos de Variáveis | | | |
|---------|------------------------|----|----|----|
| | p1 | p2 | p3 | p4 |
| AAA000 | 4 | - | - | - |
| A001 | 1 | - | 3 | - |
| A002 | 3 | 3 | 13 | 16 |
| A003 | 1 | - | 3 | - |
| A004 | 1 | - | - | - |
| A005 | 1 | - | - | - |
| A006 | 1 | - | 4 | - |
| A007 | 1 | - | 5 | - |

Tabela 4: Quantificação das Variáveis Periódicas

Variáveis Aperiódicas

As condições anormais de operação (*alarmes*), as mudanças de estado dos equipamentos (*sinalização*) e os comandos de ajuste (*set-points*) serão notificadas ao sistema de controle através de sinais aperiódicos. São definidos dois níveis de prioridade para as variáveis aperiódicas: *set-points e alarmes* - (a1) têm prioridade *urgente*; *sinalização* - (a2), têm prioridade *normal* (Tabela 5).

A expressão (5) descreve o modelo matemático das variáveis aperiódicas, onde Ca_i representa a duração da transação, Pa_i a prioridade e Da_i o prazo máximo de atendimento (*deadline*). O número de variáveis aperiódicas é representado por na .

$$va_i = (Ca_i, Pa_i, Da_i), i = 1 \dots na \quad (5)$$

| Estação | Conjuntos de Variáveis | | |
|---------|------------------------|-------------|------------------|
| | Set-Point (a1) | Alarme (a1) | Sinalização (a2) |
| AAA000 | 12 | - | - |
| A001 | - | 6 | 1 |
| A002 | - | 4 | 3 |
| A003 | - | 2 | 1 |
| A004 | - | 1 | 1 |
| A005 | - | 1 | 1 |
| A006 | - | 1 | 1 |
| A007 | - | 3 | 1 |

Tabela 5: Quantificação das Variáveis Aperiódicas

4 Escalonamento do Tráfego

As transações periódicas serão escalonadas com base no algoritmo taxa monotônica (RM), que atribui prioridades às tarefas na razão inversa dos seus períodos (Liu, 2000). Portanto, dadas duas tarefas periódicas i e j , a relação entre seus períodos (T_i, T_j) e suas prioridades (P_i, P_j) é definida por: $T_i < T_j \Rightarrow P_i > P_j$.

Deve ser observado que cada um dos períodos listados na Tab. 3 é múltiplo do período da variável mais prioritária. Neste caso o escalonamento RM será ótimo (Farines et al., 2000).

4.1 Configuração da Tabela do Árbitro de Barramento

O algoritmo de configuração da tabela do árbitro de barramento, usando o escalonamento RM, baseia-se nos seguintes passos: (1) as primeiras instâncias de todas as requisições de transmissão chegam no árbitro de barramento no início do macrociclo (*instante crítico*); (2) em cada ciclo elementar é verificado se a demanda na rede excede o valor E (Fig. 4); (3) as variáveis são escalonadas na ordem inversa de seus períodos; (4) se a demanda da rede for maior que E então a variável será escalonada para o próximo ciclo elementar, obedecendo à sua prioridade; (5) se for excedido o período de qualquer das variáveis então o conjunto das variáveis não será escalonável. Neste caso os parâmetros das variáveis deverão ser reajustados.

A aplicação deste algoritmo ao conjunto de variáveis listadas na Tabela 4 produziu uma matriz booleana $tab(i,j)$ com dimensões 73×30 , onde o índice i varia de 1 a np e j representa o ciclo elementar (Tabela 6). Cada coluna da tabela corresponde à demanda imposta pelo tráfego periódico durante o ciclo elementar considerado.

| Variáveis Periódicas | Ciclos Elementares | | | | | | | |
|----------------------|--------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 1 | 2 | ... | 6 | 7 | 8 | ... | 30 |
| vp_1 | 1 | 1 | ... | 1 | 1 | 1 | ... | 1 |
| vp_2 | 1 | 1 | ... | 1 | 1 | 1 | ... | 1 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| vp_{13} | 1 | 1 | ... | 1 | 1 | 1 | ... | 1 |
| vp_{14} | 1 | 0 | ... | 0 | 1 | 0 | ... | 0 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| vp_{17} | 1 | 0 | ... | 1 | 0 | 0 | ... | 0 |
| vp_{18} | 1 | 0 | ... | 1 | 0 | 0 | ... | 0 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| vp_{72} | 1 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | ... | 0 |
| vp_{73} | 1 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | ... | 0 |

Tabela 6: Tabela do Árbitro de Barramento

4.2 Tempos de Resposta do Tráfego Aperiódico

Devido à natureza dinâmica do tráfego aperiódico torna-se necessária a determinação do tempo de resposta de pior caso das variáveis produzidas em cada estação k . O emprego da equação (2) e de uma metodologia de cálculo que considera o critério de escalonamento descrito na subseção 2.2, resultou nos tempos mostrados na Tabela 7.

| Estação | Ra^k (ms) | |
|---------|--------------------|-------------------|
| | Prioridade Urgente | Prioridade Normal |
| AAA000 | 12,470 | - |
| A001 | 12,431 | 13,201 |
| A002 | 12,328 | 13,110 |
| A003 | 12,406 | 13,176 |
| A004 | 12,399 | 13,169 |
| A005 | 12,399 | 13,169 |
| A006 | 12,399 | 13,169 |
| A007 | 12,412 | 13,182 |

Tabela 7: Resposta do Tráfego Aperiódico

4.3 Análise de Escalonabilidade

A análise do escalonamento do tráfego periódico é automaticamente realizada durante a configuração da tabela do árbitro de barramento.

Para que as variáveis aperiódicas modeladas pela equação (5) sejam escalonáveis é necessário que sejam cumpridas duas condições: (1) o prazo máximo de atendimento deverá ser maior que o tempo de resposta de pior caso, ou seja, $Da_i > Ra^k$; (2) a cada instante deverá haver uma única requisição de cada variável.

5 Conclusões

Este artigo apresentou um modelo conceitual para o sistema de supervisão e controle de uma planta de geração de energia elétrica baseado nos conceitos da arquitetura CIM. A partir do modelo conceitual as redes de comunicação de dados do sistema podem ser mapeadas aos respectivos níveis hierárquicos do modelo.

Na seção 2 foram descritas as características básicas do padrão WorldFIP, que é um dos protocolos empregados nas redes dos níveis 0 e 1 do modelo.

A partir da equação (2), que possibilita o cálculo das durações das transações, e da adoção da disciplina de escalonamento taxa monotônica, pode ser definido um método matemático de configuração da rede WorldFIP.

A aplicação do método proposto à rede do nível 1 do SDSC das novas unidades geradoras da Itaipu comprova que os parâmetros adotados para as variáveis do sistema garantem a sua escalonabilidade e, portanto, atendem às restrições temporais das tarefas de tempo real críticas.

Referências

- Farines, J.-M., Fraga, J. S. e de Oliveira, R. S. (2000). *Sistemas de Tempo Real*, IME-USP, Escola de Computação 2000.
- Itaipu (1998). *Itaipu Hydroelectrical Power Station - Technical Specifications - 7028-20-1500-P, Chapter VI - Digital Supervision and Control System*, Itaipu Binacional, Brasil.
- Liu, J. W. S. (2000). *Real-Time Systems*, Prentice Hall.
- McGuffin, L., Reid, L. e Sparks, S. (1988). *Map/top in cim distributed computing*.
- Tovar, E. e Vasques, F. (1999). Contributions for the worst-case response time analysis of real-time sporadic traffic in worldfip networks, *Technical report*, Polytechnic Institute of Porto and University of Porto, Portugal.
- Vasques, F. e Juanole, G. (1994). Pre-run-time schedulability analysis in fieldbus networks, *Technical report*, LAAS du CNRS, Toulouse Cedex, França.
- WorldFIP (1988). *WorldFIP Protocol*, WorldFIP Organization, Clamart, França.