

Desenvolvimento de Ferramenta Computacional para o Planejamento e Projeto Otimizado de Redes de Telecomunicações da Eletronorte

Márcio Fontana, Fabiano Fragoso Costa, A. C. de C. Lima, I. D. R. Machado, Diego Guimarães e Flávio Roberto Antônio

Resumo – Neste artigo, propõe-se uma ferramenta CAD (Computer Aided Design), designada por HiperionCAD, que permite o design e a otimização de redes ópticas TDM (Time-Division Multiplexing) e WDM (Wavelength-Division Multiplexing). A ferramenta foi implementada por meio de uma abordagem do tipo Desenvolvimento Orientado a Modelo (Model-Driven Development-MDD). O HiperionCAD permite o projeto gráfico da rede óptica, além do cálculo dos seguintes parâmetros: Orçamento de Potência (PD-Power Budget), Dispersão Cromática (CD-Chromatic Dispersion) e a Dispersão do Modo de Polarização (PMD- Polarization Mode Dispersion). Além disso, o HiperionCAD oferece uma funcionalidade para otimização dos componentes da rede óptica baseada em um algoritmo genético. Assim, a otimização é realizada no sentido de garantir que o receptor no final da rede receba o mínimo de potência para garantir a transmissão do sinal óptico.

Palavras-chave – Redes ópticas, ferramenta CAD, algoritmo genéticos.

I. INTRODUÇÃO

Pesquisas recentes em softwares na academia e na indústria confirmam as vantagens de linguagens gráficas baseadas em modelos computacionais formais para o design de redes ópticas [1-3]. Considerando, ainda, que a globalização dos mercados e empresas intensificam a competição na área de telecomunicações, pode-se afirmar que o desenvolvimento de ferramentas computacionais é um assunto de crescente interesse. O software foi desenvolvido por meio de uma abordagem do tipo Desenvolvimento Orientado por Modelo (MDD). MDD é um paradigma emergente que soluciona problemas comuns associados com a composição e integra-

ção de sistemas de larga escala, alavancando avanços nas tecnologias para desenvolvimento de softwares como as baseadas em componentes mediadores (Component-based Middleware) [4]. MDD eleva o desenvolvimento de softwares para um nível maior de abstração quando comparado com linguagens de programação de terceira geração [5]. Os blocos de construção para auxiliar o desenvolvimento do software MDD incluem um modelo repositório, um ou mais linguagens de domínio específico, um ou mais modelos de ferramentas, um ou mais ambientes de bancada de trabalho e transformadores ou geradores de códigos. K. Thramboulidis e A. Zoupas [6], aplicaram uma abordagem MDD para controle e aplicações de automação com uma plataforma Java de tempo real. M. Smith *et al.* [7], desenvolveram aplicações em grades baseadas em MDD. M. Fontana *et al.* [8]-[9], empregaram a abordagem MDD no desenvolvimento e otimização de redes ópticas. Assim, pode-se concluir que a abordagem MDD pode ser aplicada em diversas situações.

O procedimento de otimização executado no HiperionCAD é baseado na premissa de que a configuração da rede está previamente fixada pelo usuário. A idéia principal é minimizar o orçamento de potência, de tal modo que a potência do sinal transmitido no início da rede óptica esteja no limite mínimo da sensibilidade do dispositivo situado no final da rede. Para realizar a otimização, deve-se considerar que os parâmetros dos componentes da rede a serem ajustados variam de maneira discreta e são limitados por valores mínimos e máximos. Dessa maneira, a otimização não é trivial. Os autores deste trabalho desenvolveram, então, um procedimento baseado em algoritmos genéticos que facilita o procedimento de otimização sobremaneira. A implementação do algoritmo impõe que cada gene está relacionado com um determinado orçamento de potência e está codificado decimalmente. O tamanho do cromossomo depende da configuração da rede e seu valor de ajuste reflete a qualidade da solução.

Este artigo apresenta os resultados das principais atividades desenvolvidas no Projeto “Desenvolvimento de uma Ferramenta Computacional para o Planejamento e Projeto Otimizado de Redes de Telecomunicações da Eletronorte” do projeto de P&D aprovado pela ANEEL com o código 007/2005, que integrou o Programa Eletronorte de Pesquisa e Desenvolvimento (PEPD) desenvolvido pela Eletronorte no ciclo 2004/2005. O projeto foi executado através de acordo firmado entre a Eletronorte – Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A e a UFBA – Universidade Federal da Bahia em parceria com UFAC – Universidade Federal do Acre. O

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do V Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (V CITENEL), realizado em Belém/PA, no período de 22 a 24 de junho de 2009.

Este artigo é resultado de um projeto de P&D financiado e apoiado pela Eletronorte (Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A) através do contrato número 4500056896.

Márcio Fontana, Fabiano Fragoso Costa, A. C. de C. Lima, I. D. R. Machado, D. Guimarães, trabalham na Universidade Federal da Bahia - UFBA - Departamento de Engenharia Elétrica – DEE - R. Aristides Novis, 02 - Federação - Salvador - BA - CEP 40210-630 (e-mails: mfontana@ufba.br, ffcosta@yahoo.com.br, acdcl@ufba.br, ivo.rocha@uol.com.br, diegobc@gmail.com).

Flávio Roberto Antônio trabalha nas Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A - Eletronorte - SCN Quadra 06 Conj. A, Blocos B e C, Entrada Norte 2, Asa Norte - Brasília - DF - CEP 70716-901 (e-mail: flavioroberto@eln.gov.br).

fato motivador do projeto era propor o desenvolvimento de uma ferramenta computacional para o planejamento e projeto otimizado de redes de telecomunicações da Eletronorte minimizando custos operacionais e maximizando recursos técnicos na ferramenta. Este artigo está organizado como se segue: A segunda seção discorre sobre a teoria básica sobre os algoritmos genéticos. A terceira seção mostra a implementação do algoritmo genético para a otimização de uma rede óptica. Na quarta seção, as principais características do software HiperionCAD são apresentadas. Na quinta seção, algumas equações fundamentais relacionadas ao escopo teórico de redes ópticas são descritas. Os resultados são esboçados na quinta seção e, finalmente, as conclusões são apresentadas na sexta seção.

II. ALGORITMOS GENÉTICOS

Algoritmos genéticos são um método de otimização. Por isso nos próximos parágrafos, discorre-se brevemente sobre os principais métodos de otimização no intuito de contextualizar o método proposto no presente artigo. A literatura científica identifica três tipos principais de métodos de busca: métodos baseados em cálculo, métodos exaustivos e métodos de busca randômicos.

Métodos de otimização baseados em cálculo são os mais tradicionais. Eles são divididos em diretos e indiretos. Métodos indiretos procuram o mínimo local resolvendo, usualmente, um conjunto de equações não lineares resultantes do procedimento de igualar o gradiente da função objetivo a zero. Métodos diretos procuram caminhar pela função, movendo-se na direção relacionada ao gradiente local. As limitações dos métodos baseados em cálculo estão relacionadas primeiramente à natureza local da busca. Ou seja, se a busca for iniciada nas vizinhanças de um ponto ótimo local, o algoritmo não irá encontrar o ótimo global. Em segundo lugar, métodos baseados em cálculos dependem da existência de derivadas da função objetivo. Mesmo se as derivadas puderem ser calculadas numericamente, em muitas ocasiões os parâmetros da função objetivo não variam suavemente restringindo assim a utilização da derivada.

A idéia fundamental dos métodos de otimização exaustivos é procurar os pontos ótimos em todos os pontos do espaço de busca. A maior limitação desse tipo de otimização é a capacidade de lidar com espaços de busca muito grandes.

Para grandes espaços de busca, a eficiência dos métodos de otimização randômicos geralmente não é melhor que a de métodos exaustivos [10]. Os métodos de otimização randômicos não devem ser confundidos com os métodos de otimização que incorporam alguns elementos de escolha aleatória. Dentre os métodos que utilizam esses elementos, encontram-se os algoritmos genéticos e o resfriamento simulado.

Algoritmos genéticos são algoritmos de busca ou otimização baseados em mecanismos que emulam processos ocorridos naturalmente na evolução das espécies. Os primeiros estudos a respeito de algoritmos genéticos foram realizados na Universidade de Michigan no começo da década de 70 por John Holland. Os objetivos básicos das pesquisas eram dois: (1) explicar rigorosamente os processos adaptativos de siste-

mas naturais; (2) desenvolver programas que retivessem as características mais importantes dos sistemas naturais.

O processo de otimização por meio de algoritmos genéticos é iniciado por uma população de indivíduos gerados ao acaso. Cada indivíduo representa uma potencial solução para o problema sob consideração, ou seja, cada indivíduo representa o conjunto de parâmetros que potencialmente minimizam ou maximizam uma função objetivo. O conjunto de indivíduos em um determinado tempo é chamado de geração. As gerações evoluem através dos operadores genéticos. A evolução significa que o conjunto de indivíduos converge para o ótimo global da função objetivo [11]. Em algoritmos genéticos os indivíduos são codificados por uma seqüência de caracteres:

$$s = s_1 s_2 \dots s_n \quad (1)$$

A seqüência s , em analogia com termos biológicos, é considerada um cromossomo formado por n genes. O caractere s_i é um gen posicionado no locus i . O cromossomo s é chamado de genótipo de um indivíduo. Uma potencial solução correspondente à seqüência s é chamada de fenótipo. É usual um mapeamento biunívoco entre fenótipos e genótipos. O mapeamento de fenótipos para genótipos é conhecido como codificação. O mapeamento de genótipos para fenótipos é conhecido como decodificação.

O ajuste de um indivíduo pode ser entendido como a medida da capacidade que ele possui de passar seu material genético para a próxima geração. O valor da função objetivo reflete essa medida. Por isso é usual igualar o valor do ajuste de uma seqüência s , com o valor da função objetivo.

Por meio dos três principais operadores genéticos e com o ajuste de cada indivíduo, a população $P(t)$ na geração t evolui para formar a próxima geração $P(t+1)$. Os três principais operadores genéticos são; reprodução, cruzamento, e mutação. A reprodução é o processo pelo qual seqüências individuais são copiadas de acordo com o valor de suas funções objetivo. Ou seja, seqüências com valores de ajustes maiores possuem maior probabilidade de contribuir com seu material genético na próxima geração.

Depois da reprodução, o cruzamento é realizado em duas etapas. Primeiramente os casais são escolhidos aleatoriamente. Então uma posição inteira k é escolhida aleatoriamente entre os caracteres da seqüência. A partir dessa posição o material genético de cada pai é dividido em duas partes e as partes são permutadas.

O último dos três principais operadores genéticos é a mutação. Ela altera um ou mais genes de um indivíduo gerado depois do cruzamento, com a probabilidade p_m . Segundo Goldberg [10], a mutação é necessária porque apesar da reprodução e do cruzamento ser mecanismos efetivos na busca de pontos ótimos, ocasionalmente eles podem ser excessivamente zelosos e conservadores, perdendo alguma potencial utilidade do material genético. A mutação serve ocasionalmente para libertar a busca de um ponto ótimo local.

III. IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO GENÉTICO

A. Estrutura

No intuito de implementar a otimização baseada em algoritmo genético no HiperionCAD, os cromossomos foram co-

dificados de modo decimal. Cada gene do cromossomo representa um valor para o orçamento de potência. Como o orçamento de potência é a função a ser otimizada, o tamanho dos cromossomos depende da configuração da rede. Cada cromossomo corresponde a uma solução potencial e o cruzamento é realizado da maneira explicada na seção anterior. O procedimento de seleção de cromossomos a serem cruzados é realizado pelo algoritmo de roleta russa.

Em relação à geração da população inicial, as opções providas pela implementação genética incluem: *Gaussian* (Desvio gaussiano servindo como base para a estimação aleatória de um número), *Cauchy* (Função densidade de probabilidade de Cauchy), e *Stock* (o gerador randômico stock utiliza a classe java.util.Random para fornecer uma implementação simples da interface RandomGenerator). Em relação ao procedimento de seleção, existem quatro opções disponíveis: *Best n Chromosomes* (emprega os melhores cromossomos para a próxima geração. O parâmetro n pode ser especificado arbitrariamente); *Tournament* (executa competições para a seleção dos cromossomos a serem utilizados na próxima geração); *Threshold* (assegura um certo valor de ajuste para os cromossomos); e *Weighted Roulette* (Modela uma roleta russa, isto é, cada cromossomo é associado a um número fixo de fendas da roleta proporcional ao seu valor de ajuste).

B. Definição da Função Objetivo

Para uma rede óptica genérica, o algoritmo genético assume que a função objetivo, F_o , é expressa por:

$$F_o = P_s - P_e \quad (2)$$

em que, P_s é a sensibilidade de potência de um pre-amplificador situado no final da rede óptica e P_e é a potência estimada no mesmo ponto da rede. O procedimento de otimização é realizado ao se minimizar F_o . Isto permite que o requisito relacionado a um dado dispositivo da rede seja mais flexível.

IV. SOFTWARE HIPERIONCAD

A. Visão Geral

MDD é uma nova abordagem para o desenvolvimento de sistemas de softwares. Assim, enfatiza-se um nível de design para o modelo pela definição de especificações para o sistema de software e pela utilização de ferramentas automáticas para gerar implementações em plataformas específicas [8]-[9], [12]. Um projeto de modelagem do eclipse [13]-[14] foi utilizado para fornecer uma ponte generativa entre a estrutura para a Modelagem do Eclipse (Eclipse Modeling Framework - EMF) e a estrutura para edição gráfica (Graphical Editing Framework - GEF). A Figura 1 mostra o diagrama que ilustra os principais componentes e modelos utilizados durante o desenvolvimento baseado em GEF.

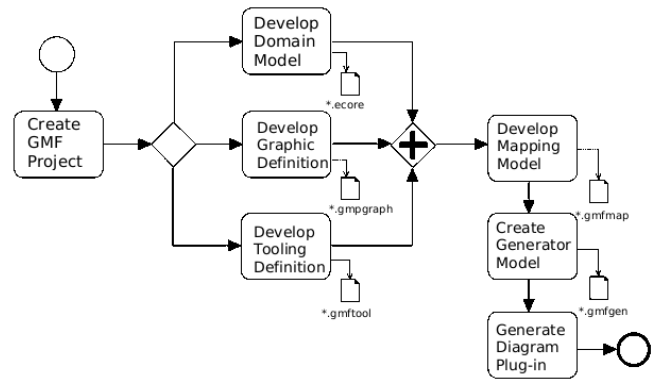


Figura 1. Visão geral do GMF

O bloco GMF origina um domínio para geração de modelo (bloco “Develop Domain Model” que executa um código Java específico [13]). O bloco GMF ainda é utilizado na criação de outros dois modelos: o modelo gráfico (bloco “Develop Graphic Definition”) utilizado para definir as figuras, nós e ligações; e o modelo para definições de ferramentas (bloco “Develop Tooling Definition”) utilizado para na especificação de palhetas, criação de ferramentas e ações. O bloco “Develop Mapping Model” reúne os três referidos blocos para, então, gerar-se um modelo final. O último modelo é utilizado para gerar o GMF (bloco “Generator Model Framework”) e pode ser automaticamente criado a partir de modelos de alto nível.

B. Arquitetura do Software

O HiperionCAD foi desenvolvido utilizando 15 plug-ins, que funcionam integrados aos componentes da plataforma Eclipse. A Figura 2 ilustra as interações entre estes plug-ins, aqui agrupados por funcionalidades para facilitar a visualização.

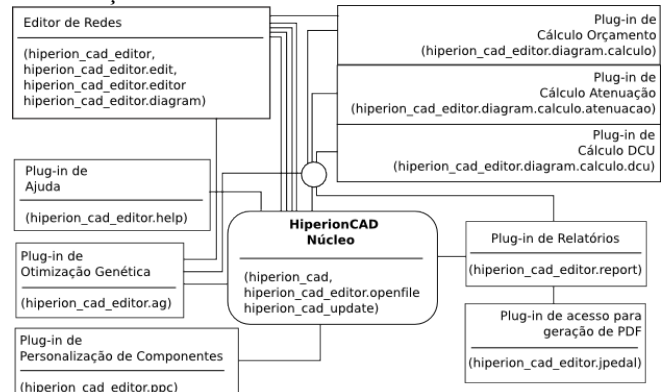


Figura 2. Arquitetura do software HiperionCAD.

O plug-in central do HiperionCAD funciona como um gerenciador dos demais plug-ins contidos no software, fornecendo e repassando eventuais informações necessárias. É nesta parte que está contida a maior parte da interface gráfica: onde serão dispostos os menus principais, as visões e principalmente, onde o sistema de atualizações é acessível.

O plug-in Editor de Redes contém toda a funcionalidade para editar redes de fibra óptica. Os plug-ins de Cálculos são responsáveis pela execução dos cálculos com rotinas específicas para executar as equações.

Os plug-ins de Ajuda e Relatórios são responsáveis, respectivamente, por conter toda a ajuda sobre o HiperionCAD

e obter todas as informações da rede óptica e gerar um relatório formatado em PDF ou RTF.

Finalmente, o plug-in de Otimização Genética é responsável pela execução dos cálculos que depende estritamente dos valores contidos nas propriedades dos componentes.

C. Interface Gráfica – Modo Edição

A Figura 3 mostra a principal interface gráfica do HiperionCAD (Graphical User Interface - GUI). Esta GUI está dividida em três regiões: superior, central e inferior. A região superior consiste de botões e barras de ferramentas personalizadas. A região central é a ambiente de trabalho do HiperionCAD. Na região inferior, encontram-se propriedades personalizadas dos componentes e uma janela para esboço gráfico da rede. À direita da figura, pode-se observar uma aba onde são mostrados todos os componentes da rede. Suporta enquadramento, cópia, colagem, recorte e zoom. O usuário cria uma simulação arrastando e deixando os componentes requeridos na aba à direita. A informação esquemática e armazenada em formato WML, o que facilita a integração com outras ferramentas no futuro.

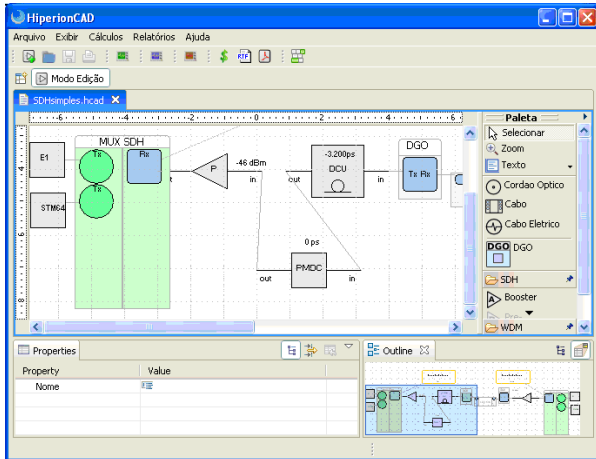


Figura 3. HiperionCAD GUI – Modo Edição

D. Interface Gráfica – Modo Otimização Genética

A execução do cálculo de Orçamento de Potência depende estritamente dos valores contidos nas propriedades dos componentes para apresentar um valor otimizado. Esse valor implicará diretamente no custo final de uma rede, uma vez que, de uma forma geral, equipamentos que produzem um sinal de maior potência custam mais do que equipamentos que produzem um sinal de potência menor, e por outro lado, fibras e conectores com menor atenuação também são mais caras.

O Algoritmo Genético ajustará os valores dos parâmetros dos componentes de forma que o resultado do cálculo não superdimensiona ou subdimensiona a potência mínima do sinal a ser entregue no receptor. O Algoritmo Genético opera sobre a rede óptica modelando os dispositivos da rede como cromossomos.

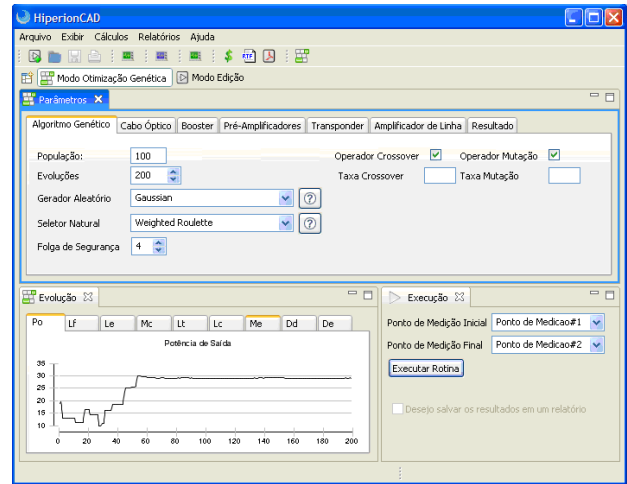


Figura 4. HiperionCAD GUI – Modo Otimização Genética

Na perspectiva denominada “Otimização Genética” do HiperionCAD foi construído um simulador com uma interface amigável, ver Figura 4. A interface do otimizador permite que o usuário ajuste todos os parâmetros passíveis de evolução, assim como a taxa de variação de cada parâmetro. Essa tarefa pode ser realizada em cada uma das abas “Algoritmo Genético”, “Cabo Óptico”, “Booster”, “Pré-Amplificadores”, “Transponder” e “Amplificador de Linha”, presentes na janela Parâmetros. A aba “Resultado”, desta mesma janela, mostra o resultado encontrado, pelo Otimizador, para cada um dos parâmetros otimizáveis presentes no enlace analisado.

A aba “Algoritmo Genético” é onde o usuário pode definir: o número de Evoluções que o otimizador deve fazer tentando encontrar uma solução ótima, ex. 200; o tipo de Gerador Aleatório, ex. Gaussian; o tipo de Seletor Natural, ex. Weighted Roulette; a Folga de Segurança entre a sensibilidade do receptor e o resultado desejado em decibéis, ex. 4.

A janela “Evolução”, mostra um gráfico com a evolução de cada parâmetro do cálculo de potência otimizado. A Figura 8.1 mostra a evolução da Potência Óptica de Saída (Po), as demais abas representam a evolução dos seguintes parâmetros: Lf, atenuação da fibra óptica, em dB/km; Le, atenuação da emenda entre as fibras de diferentes cabos, em dB; Mc, margem do cabo devido ao envelhecimento e variação de temperatura da fibra, em dB/km; Lt, variação da atenuação da fibra óptica devido à variação do comprimento de onda de emissão do laser com relação a 1550 nm, em dB/km; Lc, atenuação do conector óptico utilizado, em dB; Me, margem dos equipamentos devido ao envelhecimento, em dB; Dd, penalidade por dispersão sofrida ao longo do caminho, em dB; De, distância média entre emendas ou comprimento médio da bobina, em km.

A janela “Execução” é onde o usuário seleciona os Pontos de Medição entre os quais pretende fazer a otimização, Inicial e Final, e inicia a otimização clicando em “executar Rotina”. Ao realizar esta operação o usuário deverá aguardar que o otimizador realize as evoluções até achar um valor ótimo.

E. Diagramas de Casos de Uso

A Figura 5 ilustra o diagrama de casos de uso do HiperionCAD.

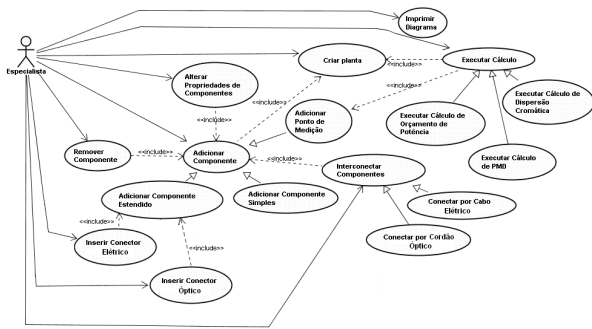


Figura 5. HiperionCAD: Diagrama de Casos de Uso

O diagrama, mostrado na Figura 5, tenta descrever a interação do usuário (especialista) com o sistema, contemplando todas as suas possíveis ações, bem como as dependências entre cada ação.

V. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA PARA REDES ÓPTICAS

Esta seção resume algumas características fundamentais de redes ópticas. Isto será útil para a elucidação dos resultados apresentados na próxima seção.

A. Orçamento de Potência

O orçamento de potência (*Power Budget-PB*) define a potência de luz requerida para superar a atenuação imposta pela rede e, assim, atingir-se um nível de potência mínimo na interface do receptor. A correta operação no link dos dados ópticos depende da luz modulada que atinge o receptor, que deve ser suficiente para a correta demodulação. Assim, PB é a potência luminosa efetivamente transmitida através da rede óptica, dada por:

$$PB = PT - PP \quad (3)$$

em que PT é a potência de saída do transmissor situado no início da rede e PP é a potência perdida ao longo da rede. Idealmente, PP deve ser igual a sensibilidade PP , do receptor no final da rede. Para configuração da rede analisada neste trabalho, PP pode ser obtido pela seguinte equação:

$$PB = PT - 3 \log N - \left[D \left(L_f + \frac{L_e}{D_e} + \frac{L_e}{D_a} + M_c + L_t \right) - \right. \quad (4)$$

$$\left. N_c L_c - T_r - D_d \right] + G_r - L_{DCU} - L_{PMD},$$

onde:

- N é o número de canais;
- L é o comprimento da rede;
- α é a atenuação da fibra;
- L_e é a atenuação da emenda óptica;
- L_b é o comprimento da bobina;
- L_d é a distância entre links ópticos a serem adicionados no futuro;
- M é margem de cabo;
- $\Delta \alpha$ é a variação da atenuação da fibra óptica;
- N_c é o número de conectores ópticos;
- α_c é a atenuação do conector óptico;
- T é o índice de tolerância para os dispositivos da rede;
- P é a penalidade para Dispersão;
- G é o ganho do amplificador de Raman;
- L_{DCU} é a atenuação da unidade de compensação de dispersão; e

• L_{α} é a atenuação do compensador de dispersão do modo de polarização.

B. Dispersão do Modo de Polarização

A dispersão do modo de polarização (*Polarization Mode Dispersion - PMD*) é o defasamento do pulso de entrada devido a um atraso de fase entre os estados de polarização de entrada. O efeito *PMD* assemelha-se aqueles verificados na dispersão cromática, mas com algumas diferenças básicas. A dispersão cromática é mais um efeito linear estável em que a compensação é relativamente fácil de implementar. Por outro lado, *PMD* é um efeito que é variante no tempo em conexões de fibra óptica, tornando-o difícil de compensar. Em sistemas de altas taxas de transmissão, o efeito *PMD* pode introduzir erros como superposição de pulsos. Neste trabalho, o *PMD* é calculado por:

$$\Delta \tau = D_{PMD} \sqrt{D} - C_{PMD} \quad (5)$$

em que:

- D_{PMD} é o coeficiente de dispersão do modo de polarização da fibra óptica (ps / \sqrt{km});
- D é o comprimento do enlace óptico (km);
- C_{PMD} é a compensação do *PMD* (ps).

O cálculo de *PMD* tem limites aceitáveis que variam de acordo com a capacidade do sinal óptico. Portanto, foi criada uma tabela com os diferentes limites aceitáveis de dispersão por modo de polarização para cada tipo de taxa de transmissão. A tabela I mostra os limites de *PMD*.

Tabela I - Limites de dispersão por modo de polarização dependente da taxa de transmissão.

SINAL	TAXA	PMD LIMITE
OC-12 (STM-4)	622 Mbps	≤ 160 ps
OC-48 (STM-16)	2.5 Gbps	≤ 40 ps
OC-192 (STM-64)	10 Gbps	≤ 10 ps
OC-768 (STM-256)	40 Gbps	≤ 2.5 ps

C. Dispersão Cromática

Dispersão cromática (*Chromatic Dispersion - CD*) é um alargamento de um sinal de entrada imposto pela fibra óptica. O conceito de *CD* está relacionado ao conceito de fase óptica e de atraso de grupo (*Group Delay - GD*). GD é definido como a primeira derivada da fase óptica em relação à frequência. A dispersão cromática é a segunda derivada da fase óptica em relação à frequência. Estas quantidades são representadas como se segue:

$$GD = \frac{\partial \phi}{\partial \omega} \quad (6)$$

$$CD = \frac{\partial^2 \phi}{\partial \omega^2} \quad (7)$$

em que ϕ é a fase óptica e ω é a frequência óptica. Neste trabalho, CD é simplificado e fornecido por:

$$CD = D_\lambda D - C_{DCU} \quad (8)$$

em que,

- D_λ é o coeficiente de dispersão da fibra óptica por comprimento de onda ($ps/(nm \times km)$);
- D é o comprimento da rede (km);
- C_{DCU} é a compensação do DCU (ps).

O cálculo de dispersão, também, tem limites aceitáveis que variam de acordo com a capacidade do sinal óptico. Portanto, foi criada uma tabela com os diferentes limites aceitáveis de dispersão para cada tipo de taxa de transmissão. As taxas não citadas possuem limites muito elevados, sendo, portanto, desprezados. A tabela II ilustra os limites da dispersão dependente da taxa de transmissão.

Tabela II - Limites da dispersão dependente da taxa de transmissão.

SINAL	TAXA	DISPERSÃO LIMITE
OC-12 (STM-4)	622 Mbps	≤ 20000 ps
OC-48 (STM-16)	2.5 Gbps	≤ 1000 ps
OC-192 (STM-64)	10 Gbps	≤ 200 ps
OC-768 (STM-256)	40 Gbps	≤ 40 ps

VI. RESULTADOS

A. Resultados Referentes ao Software HiperionCAD

A primeira simulação apresentada nesta seção é referente ao cálculo do orçamento de potência da rede desenhada na Figura 6. Neste exemplo, a sensibilidade de potência no pré-amplificador, P_s , é -50 dBm e as principais características da fibra são:

- 200 km de comprimento;
- fibra com dispersão não-nula (Non Zero Dispersion NZD);
- coeficiente de dispersão $D_\lambda = 4,0$ ps/(nm × km);
- coeficiente de dispersão $D_{DCU} = 0,5$ ps/√km;
- Dispersão calculado pelo HiperionCAD, $D_{DCU} = 860$ ps;
- D_λ calculado pelo HiperionCAD, $D_\lambda = 7,33$ ps.

Aplicando a ferramenta de otimização genética, os parâmetros calculados são: $\alpha = 19,0$; $\beta = 0,22$; $\gamma = 0,06$; $\delta = 4,0$; $M_c = 0,01$; $\epsilon = 0,01$; $\zeta = 0,1$; $\eta = 2,0$; e $\theta = 0,4$.

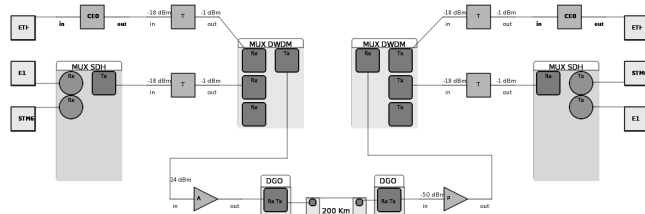


Figura 6. Rede óptica WDM.

Apesar da otimização dos parâmetros assegurarem um valor ótimo para o orçamento de potência, deve-se considerar no projeto da rede óptica suas características de limites para PMD e CD . As Figuras 7 e 8 comparam o PMD e CD da fibra, $7,33$ ps e $8,33$ ps, respectivamente com seus valores limites para diferentes taxas de transmissão. Assim, observando-se as curvas de PMD , verifica-se que a rede óptica é capaz de transmitir dados até uma taxa de transmissão de 4 Gbps sem comprometimento de informação. Observando-se as curvas

de CD na Figura 8, verifica-se que o CD da fibra impõe um limite inferior por volta de 2×10^3 ps para que os dados sejam transmitidos adequadamente.

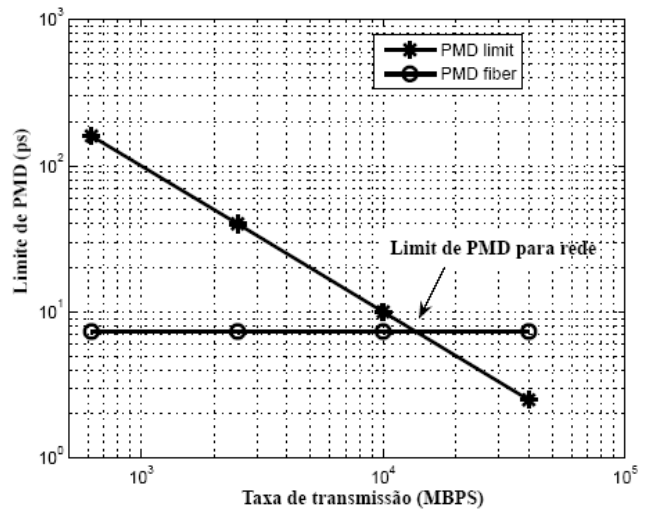


Figura 7. Limites de PMD para a rede óptica.

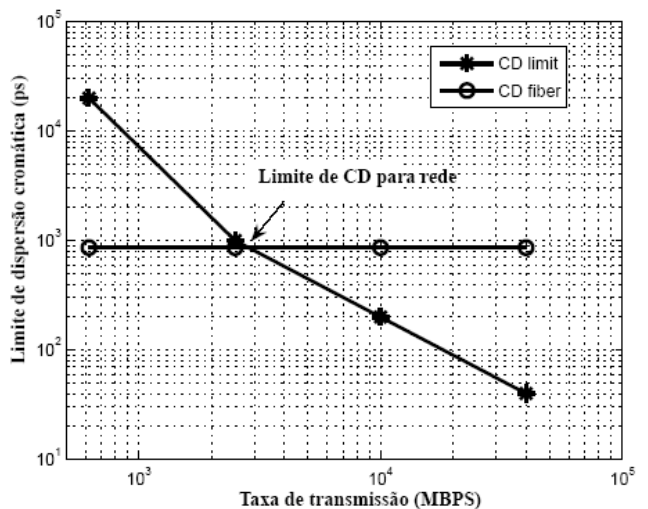


Figura 8. Limites de CD para a rede óptica.

Suponha agora que se deseje transmitir dados em uma taxa de 40 Gbps por canal na fibra. Como os limites de PMD e CD restringem esta taxa, deve-se inserir compensadores na rede original de tal forma que problemas de polarização e dispersão sejam mitigados. Para este caso, seleciona-se uma atenuação de PMD de 3 ps e uma atenuação de CD de 4 ps. O diagrama para nova rede compensada é mostrado na Figura 9.

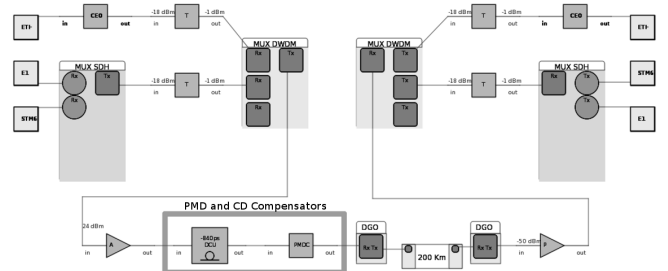


Figura 9. Rede óptica WDM com compensadores.

Novamente, pode-se utilizar a otimização genética para a determinação dos parâmetros da rede compensada: $P_B=20$; $L_f=0,2$; $L_e=0,06$; $D_e=4,0$; $M_e=0,02$; $L_r=0,01$; $L_c=0,3$; $T_f=1,5$; $D_d=0,5$. A Figura 10 mostra a variação de $\square\square$ em função do número de canais para três casos: (a) orçamento de potência para rede óptica da Figura 6, sem nenhuma otimização; (b) orçamento de potência para rede da Figura 9, com os parâmetros otimizados; (c) orçamento de potência para rede mostrada na Figura 9, com os parâmetros otimizados e oito canais.

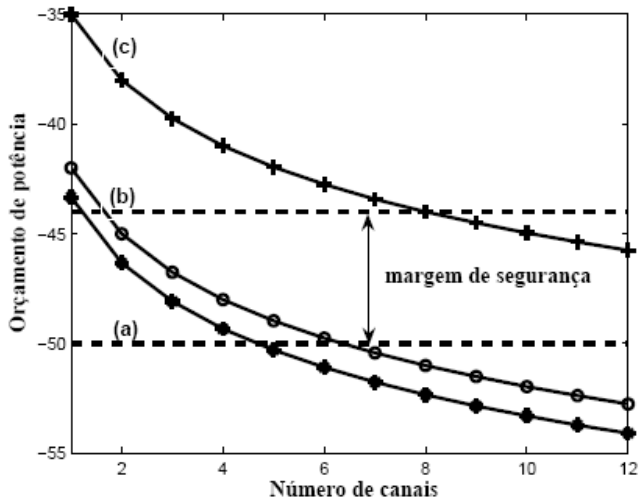


Figura 10. Variação do orçamento de potência em função do número de canais.

Para o primeiro caso, na Curva (a), verifica-se que devido à margem de segurança, somente um canal pode ser transmitido. Entretanto, como mencionado anteriormente, para altas taxas de transmissão, $\square\square$ e $\square\square$ PMD podem induzir erros na recepção. Desta maneira, necessita-se a introdução de compensadores $\square\square$ e $\square\square$ na rede óptica. Para o segundo caso, observa-se que mesmo com a inserção dos compensadores, a Curva (b) está acima da Curva (a). Este resultado é melhor do que o obtido com um procedimento heurístico de ajuste de parâmetros, representado pela Curva (a), mas não permite altas taxas de transmissão para os oito canais. Finalmente, para o terceiro caso, nota-se na Curva (c) que a rede óptica é capaz de transmitir oito canais sem nenhum problema associado à dispersão ou polarização. Quando a margem de segurança é negligenciada, o número de canais pode ser aumentado para acima de doze.

B. Resultados Referentes à Produção

Um novo sistema (software) automatizado foi disponibilizado à empresa para realizar o planejamento e projeto otimizado de redes de telecomunicações para diferentes topologias.

C. Resultados Referentes à Capacitação

O projeto foi realizado dentro do programa de graduação e pós-graduação do Departamento de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica da UFBA. Durante o decorrer do projeto foram incorporados 6 (seis) alunos de iniciação científica e 2 (dois) alunos de pós-graduação como planejado na proposta

inicial submetida a Eletronorte e ANEEL.

No caso específico dos alunos de mestrado, um estudante da UFBA desistiu devido a uma oferta de emprego irrecusável; e o outro estudante da UFAC (Bacharel em Sistemas de Informação) faleceu durante o andamento do projeto. Como já havia transcorrido 50% do prazo de execução, a finalização de um mestrado para um novo bolsista não ocorreria antes do término do projeto. Dessa forma, tecnicamente ficou inviabilizado a obtenção dos títulos de mestres como proposto no projeto inicial.

D. Resultados Referentes à Instituição

O Departamento de Engenharia Elétrica da UFBA avançou na consolidação do grupo de pesquisa com competência na área de processamento de sinais e agregou conhecimento na área de programação de alto desempenho computacional. O Departamento de Matemática da UFAC desenvolveu uma nova parceria e instalou um Mini-Laboratório (seis computadores) com recursos áudio-visuais (Notebook e projeto multimídia) para o curso de graduação.

Dentre os resultados referentes à instituição foi proposto a participação em conferências, seminários, congressos e elaboração de artigos em revistas. Abaixo estão listados 3 (três) trabalhos apresentados e publicados em eventos reconhecidos nacionalmente e internacionalmente.

- 1 - Ugo Sangiorgi, Diego Guimarães, Paulo Bichara, Antonio Lima, Ivo Machado, Luiz Almeida, Marcio Fontana. "HiperionCAD: Desenvolvimento Orientado a Modelos Aplicado ao Projeto de Redes de Fibra Óptica", Primeiro Workshop em Desenvolvimento Rápido de Aplicações (WDRA 2007), 26 de junho de 2007, Porto de Galinhas – PE.
- 2 - Fontana, M.; Costa, F. F.; Sangiorgi, U. B.; Bichara, P. A. D.; Guimaraes, D.; de Lima, A. C. C.; "HiperionCAD: a CAD tool for design and optimization of optical telecommunication", 10th International Conference on Advanced Communication Technology, 2008. ICACT 2008, Volume 3, 17-20 Feb. 2008, Page(s):2027 – 2032, Phoenix Park, Gangwon-Do, Republic of Korea.
- 3 - M. Fontana, U. B. Sangiorgi, P. A. D. Bichara, F. F. Costa, and A. C. de C. Lima; "A Computer Aided Design for Optimization of Optical Networks", 12th International Conference on Optical Networking Design and Modeling, Vilanova i la Geltrú, Catalonia, Spain, March 12-14, 2008.

E. Resultados Referentes à Concessionária

O processo interno foi melhorado utilizando uma metodologia computacional que tem como função otimizar o planejamento e o projeto de diferentes tipos de redes ópticas. O projeto indiretamente, também, melhorou a qualidade do serviço prestado pela Eletronorte.

A estratégia de difusão tecnológica dos resultados deste projeto foi composta por: reuniões realizadas entre a equipe

da UFBA e representantes da Eletronorte, tanto presenciais quanto via e-mails, tendo sido as primeiras realizadas em Brasília; envio de equipe da UFBA para o Acre ao final do primeiro ano, para realização de transferência de resultados e conhecimento, onde foi realizado o curso Plataforma Eclipse e suas Tecnologias; e por último foi realizado com sucesso uma viagem da equipe UFBA para Brasília no intuito de realizar a última transferência de resultados para a Eletronorte.

VII. CONCLUSÕES

Neste artigo, apresentou-se uma nova ferramenta de software CAD para o design e otimização de redes ópticas, batizada de HiperionCAD e desenvolvida pela utilização de uma abordagem MDD. O software traz um otimizador genético que permite ajustar os parâmetros da rede no sentido de reduzir custos. Os resultados mostraram a efetividade do software para redes compostas por diferentes elementos. Durante a construção do HiperionCAD foi apresentada uma sistematização para identificar e diagnosticar as possíveis limitações encontradas em enlaces de fibra óptica de longa distância. Essas limitações foram relacionadas às elevadas taxas de transmissão possíveis e às tecnologias vigentes, e deste arranjo foram encontradas soluções viáveis para a implementação do software.

O cálculo de orçamento de potência empregado em redes SDH pela Eletronorte teve de ser adaptado para as redes WDM. A nova fórmula matemática empregada na determinação da potência óptica dos enlaces, também leva em consideração a atenuação devido à inserção de equipamentos de compensação de *PMD* e *CD*. Também foi necessário desenvolver uma fórmula matemática para determinação de problemas de Dispersão e *PMD* em enlaces ópticos. No entanto, para cada taxa de transmissão de dados existe um valor máximo de Dispersão e *PMD* que o pulso óptico é capaz de suportar sem gerar erros de decodificação. Portanto foi proposto duas tabelas relacionam as taxas de transmissão comumente utilizadas em enlaces ópticos com os respectivos limites de *PMD* e *CD*. Para tornar essa análise possível teve de ser criada uma propriedade nos multiplexadores DWDM, CWDM e OADM para fornecer o valor da taxa de transmissão do maior canal transmitido por aquele equipamento.

As simulações mostraram que mesmo que o projetista tentasse algumas vezes era muito difícil encontrar valores para amplificadores e cabos ópticos que, não representassem desperdício de potência óptica, o que em termos práticos significa desperdício de dinheiro. Para evitar esses inconvenientes o otimizador genético foi implementado com sucesso no software, fazendo a otimização dos parâmetros relevantes para o cálculo de orçamento de potência a partir de uma folga pré estabelecida pelo projetista. Finalmente, o HiperionCAD pode ser utilizado para projetar redes de transmissão de dados por fibra óptica utilizando tecnologia TDM ou WDM. Além disso, o software pode prever problemas com *CD* e *PMD*, podendo inclusive ser utilizado para projetar soluções viáveis para estes inconvenientes. Depois de realizadas estas operações é possível otimizar as especificações dos componentes utilizando algoritmo genético, minimizando custo e tempo.

Esse projeto ativa um conjunto de sugestões para futuros trabalhos de pesquisa. Estas sugestões têm por objetivo dar prosseguimento às investigações sobre otimização, planejamento e projeto de diferentes tipos de redes ópticas. Os principais trabalhos identificados para serem desenvolvidos são: a) modelar a dependência de taxas de dados nas redes ópticas; b) estudar o comportamento das dependências das propriedades dinâmicas das fibras ópticas; e c) ampliar as funcionalidades da ferramenta computacional HiperionCAD para projetos de redes ópticas internas as edificações.

VIII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] P. Murthy, E. Cohen, and S. Rowland, System canvas: A new design environment for embedded DSP and telecommunication systems, Proceedings of the Ninth International Symposium of the Hardware/Software Codesign – CODES, April, 2001.
- [2] J. Buck, S. Ha, E. Lee, and D. Messerschmitt, Ptolemy: a framework for simulating and prototyping heterogeneous systems, Intl. J. of Computer Simulation, April, 1994.
- [3] R. Lauwereins, P. Wauters, M. Ade, and J. Peperstraete, Geometric parallelism and cyclo-static data flow in grape-ii, Proceedings of the Fifth International Workshop on Rapid System Prototyping, June, 1994.
- [4] H. Li, Model-driven development of radar control software, Proceedings of the 8th International Conference on Signal Processing - IC-SP2006, 2006.
- [5] K. Balasubramanian, A. Gokhale, G. Karsai, J. Sztipanovits, and S. Neema, Developing applications using model-driven design environments, *Computer* 39(2): 33–40, 2006.
- [6] K. Thramboulidis, and A. Zoupas, Real-time java in control and automation: a model driven development approach, Proceedings of the 10th IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation – ETFA 2005.
- [7] M. Smith, T. Friese, and B. Freisleben, Model driven development of service-oriented grid applications, Proceedings of the Advanced International Conference on Telecommunications and International Conference on Internet and Web Applications and Services - AICTICIW'06, 2006.
- [8] M. Fontana, F.F. Costa, U.B. Sangiorgi, P.A.D. Bichara, D. Guimarães, and A.C. de C. Lima, A computer aided design for optimization of optical networks, Proceedings of the 12th Conference on Optical Network Design and Modelling - ONDM 2008, Vilanova i la Geltru, Catalonia, Spain, March, 2008.
- [9] M. Fontana, F.F. Costa, U.B. Sangiorgi, P.A.D. Bichara, D. Guimarães, and A.C. de C. Lima, Hiperioncad: a cad tool for design and optimization of optical telecommunication, Proceedings of the 10th International Conference on Advanced Communication Technology - ICACT 2008, Phoenix Park, Korea, February, 2008.
- [10] D. E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search Optimization and Machine Learning*, Addison Wesley Longman, 2006.
- [11] M. Sakawa, *Genetic Algorithms and Fuzzy Multiobjective Optimization*, Kluwer Academic, 2002.
- [12] U. Sangiorgi, D. Guimarães, P. Bichara, A.C. de Lima, I. Machado, L. Almeida, and M. Fontana, Hiperioncad: Desenvolvimento orientado a modelos aplicado ao projeto de redes de fibra óptica, Proceedings of the Primeiro Workshop em Desenvolvimento Rápido de Aplicações - WDRA 2007, 2007.
- [13] Eclipse (2007a). Eclipse modeling project (emp). <http://www.eclipse.org/modeling>.
- [14] Eclipse (2007b). Graphical modeling framework (gmf). <http://www.eclipse.org/gmf>.