

Optimización multiobjetivo en transmisiones de redes multicast utilizando Simulated Annealing*

Yezid Donoso**, Kadel Lacatt*** y Alfonso Jiménez****

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Computación, Universidad del Norte,
Barranquilla (Colombia)

Resumen

En este artículo se presenta un método de optimización multiobjetivo para la solución del problema de balanceo de carga en redes de transmisión multicast, apoyándose en la aplicación de la meta-heurística de Simulated Annealing (Recocido Simulado). El método minimiza cuatro parámetros básicos para garantizar la calidad de servicio en transmisiones multicast: retardo origen destino, máxima utilización de enlaces, ancho de banda consumido y número de saltos. Los resultados devueltos por la heurística serán comparados con los resultados arrojados por el modelo matemático propuesto en investigaciones anteriores¹.

Palabras claves: Redes multicast, recocido simulado, optimización.

Abstract

This paper presents a multi-objective optimization method which is an alternative solution for multicast networks load balancing, using a software implementation of the Simulated Annealing heuristic. The method minimize four basic parameters necessary for guarantee the quality of service (QoS) in multicast transmissions, these are: end-to-end delay, maximum link utilization, bandwidth consumption and hop count. The results obtained by the heuristic will be compared with the results hurred by the mathematical pattern proposed in previous investigations.

Key words: Multicast networks, simulated annealing, optimization.

Fecha de recepción: 7 de diciembre de 2004
Fecha de aceptación: 21 de octubre de 2005

* Este artículo forma parte de los resultados de la investigación "Aplicación de ingeniería de tráfico en redes multicast".

** Ingeniero de Sistemas y Minor en gestión de proyectos de Ingeniería, Universidad del Norte. Magíster en Ingeniería de sistemas y computación, Universidad de los Andes. D.E.A. y candidato a grado de Ph.D. en Redes Telemáticas, Universidad de Girona (España). Profesor del Departamento de Ingeniería de Sistemas, Universidad del Norte. ydonoso@uninorte.edu.co

Dirección: Km 5 vía Puerto Colombia, Barranquilla (Colombia).

*** Ingeniero de Sistemas, Universidad del Norte. klacatt@unimail.uninorte.edu.co.

**** Ingeniero de Sistemas, Universidad del Norte. ajimenez@unimail.uninorte.edu.co.

¹ DONOSO MEISEL, Yezid y FABREGAS Ramón (2004). Multiobjective Optimization Algorithm for multicast routing with traffic engineering. Universitat de Girona (España).

INTRODUCCIÓN

Cuando se implementa una red, uno de los objetivos claves que se persigue es el óptimo de desempeño operacional de ésta, buscando reducir la congestión de tráfico e incrementando la utilización de los recursos de la red. Lo anterior se logra configurando rutas explícitas sobre la red física, de tal forma que la distribución del tráfico se haga de manera balanceada.

Aprovechando las ventajas que ofrece el multicasting, sobre las redes de este tipo (multicast routing) se implementan aplicaciones de videoconferencia, simulación interactiva distribuida, ambientes de colaboración en línea, etc., todas de gran exigencia tanto física (dispositivos de interconexión) como de recursos de red (delay times, hop count, maximum link utilization, etc.), lo cual convierte a la transmisión multicast en un robusto esquema que requerirá una solución más compleja en cuanto a calidad de servicio se refiere.

Los protocolos de enrutamiento multicasting existentes garantizan que los paquetes que salen desde un origen determinado lleguen a un grupo de nodos destino, sin embargo, dichos protocolos presentan deficiencias al no garantizar calidad de servicio cuando el tráfico en la red es muy pesado.

Para lograr un incremento en calidad de servicio, se debe lograr primero un óptimo balanceo de carga, donde el principal objetivo es reducir la congestión en puntos claves y susceptibles e incrementar la utilización de recursos de la red.

1. SIMULATED ANNEALING

Dada la dificultad práctica para resolver de forma exacta (simplex, "ramificación y acotación", teoría de grafos, etc.) toda una serie de importantes problemas combinatorios para los cuales, por otra parte, es necesario ofrecer alguna solución dado su interés práctico, comenzaron a aparecer algoritmos que proporcionan soluciones factibles², las cuales, aunque no optimicen la función objetivo, se supone que al menos se acercan al valor óptimo en un tiempo de cálculo razonable. Podríamos llamarlas, en lugar de óptimas, "satisfactorias", pues al menos es de suponer que son lo suficientemente buenas como para servirnos.

Este tipo de algoritmos se denominan heurísticas, del griego *heuriskein*, "encontrar" (palabra quizá no demasiado afortunada según apunta Reeves

² que satisfacen las restricciones del problema.

[1993], dado que siendo más exactos, en principio lo que hacen es buscar). Aunque en un primer momento no fueron bien vistas en los círculos académicos, acusadas de escaso rigor matemático [Eilon, 1977], su interés práctico como herramienta útil que da soluciones a problemas reales, les fue abriendo poco a poco las puertas, sobre todo a partir de la mitad de los años setenta con la proliferación de resultados en el campo de la complejidad computacional.

Una posible manera de definir estos métodos es como “procedimientos simples, a menudo basados en el sentido común, que se supone ofrecerán una buena solución (aunque no necesariamente la óptima) a problemas difíciles, de un modo fácil y rápido” [Zanakis, Evans, 1981].

Son varios los factores que pueden hacer interesante la utilización de algoritmos heurísticos para la resolución de un problema:

- a. **Cuando no existe un método exacto de resolución o éste requiere mucho tiempo de cálculo o memoria.** Ofrecer entonces una solución que sólo sea aceptablemente buena resulta de interés frente a la alternativa de no tener ninguna solución en absoluto.
- b. **Cuando no se necesita la solución óptima.** Si los valores que adquiere la función objetivo son relativamente pequeños, puede no merecer la pena esforzarse (con el consiguiente costo en tiempo y dinero) en hallar una solución óptima que, por otra parte, no representará un beneficio importante respecto a una que sea simplemente sub-óptima. En este sentido sí puede ofrecer una solución mejor que la actualmente disponible; esto puede ser ya de interés suficiente en muchos casos.
- c. **Cuando los datos son poco fiables.** En este caso, o bien cuando el modelo es una simplificación de la realidad, puede carecer de interés buscar una solución exacta, dado que de por sí ésta no será más que una aproximación de la real, al basarse en datos que no son los reales.
- d. **Cuando limitaciones de tiempo, espacio (para almacenamiento de datos), etc., obliguen al empleo de métodos de rápida respuesta, aun a costa de la precisión.**
- e. **Como paso intermedio en la aplicación de otro algoritmo.** A veces son usadas soluciones heurísticas como punto de partida de algoritmos exactos de tipo iterativo.

Una importante ventaja que representan las heurísticas respecto a las técnicas que buscan soluciones exactas es que, por lo general, permiten una mayor flexibilidad para el manejo de las características del problema. No suele resultar complejo diseñar algoritmos heurísticos que en lugar de considerar funciones lineales utilicen no linealidades. Además, generalmente ofrecen más de una solución, lo cual permite ampliar las posibilidades de elección del que decide, sobre todo cuando existen factores no cuantificables que no han podido ser añadidos en el modelo, pero que también deben ser considerados.

Por otra parte, suele ser más fácil de entender (por parte de los directivos de las empresas y gente no experta en formulación) la fundamentación de las heurísticas que los complejos métodos matemáticos que utilizan la mayoría de técnicas exactas.

Por el contrario, también representa inconvenientes el uso de métodos heurísticos. Uno de ellos es que por lo general no es posible conocer la calidad de la solución, es decir, cuán cerca está del óptimo, X^* , la solución X_{heu} que nos ofrecen. Si, por ejemplo, el problema es de maximización, lo único que sabemos es que $X_{\text{heu}} \leq X^*$.

2. MODELO ANALÍTICO AL PROBLEMA PROPUESTO

La red es modelada en un grafo directo $G=(N,E)$, donde N es el conjunto de nodos y E es el conjunto de enlaces. Se denotara al número de nodos con la letra n , y la s como las fuentes (ingreso de nodos), siendo que $s \in N$, y algunos destinos T (conjunto de nodos sumideros), donde $t \in T$ es cualquier nodo destino. Se tendrá $(i, j) \in E$, que representa el enlace desde el nodo i hasta el nodo j . También se tiene una variable $f \in F$, que es cualquier nodo donde haya fluido multicast, donde F es el conjunto de nodos donde hay fluido y Tf es el nodo destino en el fluido en una transmisión multicast f . Se denota por $|F|$ el número de transmisiones.

Se obtiene, $T = \bigcup_{f \in F} T_f$

El X_{ij}^f es la fracción de f a los nodos destinos t utilizando un enlace (i, j) . Hay que notar que se incluye el nodo de destino t , que no había sido utilizado en otros trabajos. El incluir el nodo destino permite controlar el ancho de banda consumido en cada enlace con destino al conjunto de nodos destinos.

En la solución del problema, la variable X_{ij}^{tf} provee valores óptimos en el flujo de información en la red.

La variable c_j es la capacidad en cada enlace (i, j) , y bw es la demanda de fluido f por los nodos fuentes s a T_f . La variable binaria Y_{ij}^{tf} representa cuándo el enlace (i, j) es usado (1) o no (0) por el árbol multicast enrutado por el nodo fuente s y los enlaces involucrados con el conjunto de nodos fuente T_f .

La variable v_{ij} representa el retraso en el enlace (i, j) , y m es el número de variables en la función multiobjetivo. La variable $connection_{ij}$ indica si ahí hay un enlace entre un nodo i y otro j .

El problema de minimización $|F|$ en transmisiones multicast desde nodos fuentes s a los nodos destinos en cada subconjunto T_f es formulado a continuación.

Minimizar

$$r_1 \cdot \alpha + r_2 \sum_{f \in F} \sum_{t \in T_f} \sum_{(i,j) \in E} Y_{ij}^{tf} + r_3 \sum_{f \in F} \sum_{(i,j) \in E} bw \max_{t \in T_f} (X_{ij}^{tf}) + r_4 \sum_{f \in F} \sum_{t \in T_f} \sum_{(i,j) \in E} v_{ij} Y_{ij}^{tf} \quad (\text{MHDB model}) \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{(i,j) \in E} X_{ij}^{tf} - \sum_{(i,j) \in E} X_{ji}^{tf} = 1, \quad t \in T_f, f \in F, i = s \quad (2)$$

$$\sum_{(i,j) \in E} X_{ij}^{tf} - \sum_{(i,j) \in E} X_{ji}^{tf} = -1, \quad i, t \in T_f, f \in F \quad (3)$$

$$\sum_{(i,j) \in E} X_{ij}^{tf} - \sum_{(i,j) \in E} X_{ji}^{tf} = 0, \quad t \in T_f, f \in F, i \neq s, i \notin T_f \quad (4)$$

$$\sum_{f \in F} bw f \cdot \max_{(i,j) \in E} (X_{ij}^{tf}) \leq c_{ij} \cdot \alpha, \quad \alpha \geq 0, (i, j) \in E \quad (5)$$

$$\sum_{j \in N} Y_{ij}^{tf} \leq \left[\begin{array}{c} bw_f \\ \sum_{j \in N} c_{ij} \\ \hline \sum_{j \in N} connection_{ij} \end{array} \right] \quad i \in N, f \in F \quad (6)$$

donde

$$X_{ij}^{tf} \in \mathbb{Z}, 0 \leq X_{ij}^{tf} \leq 1 \quad (7)$$

$$Y_{ij}^{tf} = \lceil X_{ij}^{tf} \rceil = \begin{cases} 0, & X_{ij}^{tf} = 0 \\ 1, & 0 < X_{ij}^{tf} \leq 1 \end{cases} \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^m r_i = 1, r_i \in \mathfrak{R}, r_i \geq 0, m > 0 \quad (9)$$

La función multiobjetivo (MHDB model)(1) define la función y genera un solo métrico agregado por una combinación de objetivos.

El objetivo principal consiste en minimizar el máximo utilización de enlaces (MLU), el cual es representado con α en (1). En este caso, la solución obtenida puede obtener rutas largas. El siguiente es la minimización de saltos (HC); el término $\sum_{f \in F} \sum_{i \in T_f} \sum_{j \in E} Y_{ij}^{tf}$ es agregado. Esto es útil porque en la función objetivo puede mostrar sólo el link más congestionado y una solución óptima puede ser incluirlo en un camino innecesariamente largo con la finalidad de invitar el cuello de botella.

El siguiente objetivo es minimizar el consumo de ancho de banda (BC) sobre los enlaces; el término $\sum_{f \in F} \sum_{i \in T_f} bw_f \max_{j \in E} (X_{ij}^{tf})$ es también incluido.

Este termino es incluido, ya que si se obtiene más de una solución como la mejor utilización máxima de enlaces, la solución con el mínimo uso de los recursos es escogida.

Además, se debe minimizar el retraso entre el total de todos los enlaces; el término $\sum_{f \in F} \sum_{t \in T} \sum_{(i,j) \in E} v_{ij} Y_{ij}^{tf}$ es incluido.

En (2),(3) y (4) se conserva el flujo. El (2) es el total de flujo para emerger de los nodos fuentes a los nodos destinos t ; con un flujo f que puede ser 1. El (3) es el flujo total comenzando desde los nodos destinos t ; en el flujo puede ser 1.

En el (4) se asegura que por los diferentes nodos intermedios de las fuentes ($i \neq s$) y los nodos destinos ($i \notin T$), la suma de las salidas de flujo a los nodos destinos t menos la entrada de flujo de los nodos destinos t debe dar como resultado 0.

El (5) es el máximo uso de los link. En una conexión unicast, el monto total de ancho de banda consumida por todos los flujos con destino a los nodos t puede no exceder la máxima utilización (α) por capacidad del enlace c_{ij} que es

$$\sum_{f \in F} bwf \sum_{t \in T} X_{ij}^{tf} \leq c_{ij} \alpha, (i, j) \in E$$

Hay que tener en cuenta que en (5) sólo el máximo valor de X_{ij}^{tf} para $t \in T_f$ debe ser considerado. Varios subflujos del flujo f en el enlace (i,j) son enviados a diferentes nodos destinos.

El (6) limita el máximo número de subflujos a cada nodo dependiendo de la capacidad de cada enlace y el tráfico por la demanda. Esta formulación representa el uso necesario de enlaces con la demanda del tráfico; sin este ítem, el modelo puede sufrir problemas de escalabilidad.

En (7) se muestra que la variable X_{ij}^{tf} puede ser un número real entre 0 y 1. Estas variables son para árboles múltiples para transportar flujo en multicast. La demanda entre los nodos fuentes y los nodos destinos t puede ser por múltiples rutas. Cuando el problema es resuelto sin el balanceo de carga, esta variable puede tomar valores de 0 y 1, lo que demuestra si un enlace (i,j) es utilizado o no.

En (8) se calcula Y_{ij}^{tf} como una función de X_{ij}^{tf} .

Finalmente, en la expresión (9) se muestra que el peso de los coeficientes, r_i , es asignado cuando el objetivo es normalizado. Estos valores son calculados durante la solución del problema de optimización.

El problema presentado es NP-hard porque el problema de computación del costo mínimo en el árbol para un grupo multicast es conocido como un NP-Completo, y este modelo incluye variables reales y constantes enteros.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Tabla 1

Resultados obtenidos de la aplicación SMOSA para una red de 50 nodos

| Valores de la solución analítica de GAMS para 50 nodos | | | | | |
|--|------------|--------|-----------|---------|------------|
| Nodos | Porcentaje | HP-MIN | delay-MIN | bw- MIN | alpha- MIN |
| 5 | 10% | 50 | 735 | 6339 | 0,50 |
| 10 | 20% | 115 | 1617 | 14100 | 0,50 |
| 15 | 30% | 173 | 2301 | 21112 | 0,50 |
| 20 | 40% | 225 | 3165 | 27932 | 0,50 |
| 25 | 50% | 287 | 3964 | 35131 | 0,50 |
| 30 | 60% | 347 | 4661 | 42100 | 0,50 |
| 35 | 70% | 401 | 5418 | 48967 | 0,50 |
| 40 | 80% | 467 | 6408 | 57079 | 0,50 |
| 45 | 90% | 536 | 7261 | 64160 | 0,50 |

Tabla 2

Resultados obtenidos de la aplicación del modelo matemático

| Valores mínimos de la solución obtenida por la aplicación SMOSA para 50 nodos | | | | | |
|---|------------|--------|------------|---------|------------|
| Nodos | Porcentaje | HP-MIN | delay- MIN | bw- MIN | alpha- MIN |
| 5 | 10% | 58 | 733 | 6244 | 0,501961 |
| 10 | 20% | 126 | 1538 | 13792 | 0,501961 |
| 15 | 30% | 198 | 2414 | 21375 | 0,501961 |
| 20 | 40% | 269 | 3218 | 29172 | 0,501961 |
| 25 | 50% | 332 | 4011 | 35802 | 0,501961 |
| 30 | 60% | 390 | 4857 | 42794 | 0,501961 |
| 35 | 70% | 456 | 5623 | 50862 | 0,501961 |
| 40 | 80% | 544 | 6750 | 61229 | 0,501961 |
| 45 | 90% | 606 | 7563 | 68109 | 0,501961 |

Se puede observar de las tablas 1 y 2 que los datos se encuentran relativamente cercanos unos a otros, y que en algunos casos la simulación encuentra valores mejores o menores que la analítica y viceversa. Veremos el comportamiento de ambas en las figuras 1, 2 y 3.

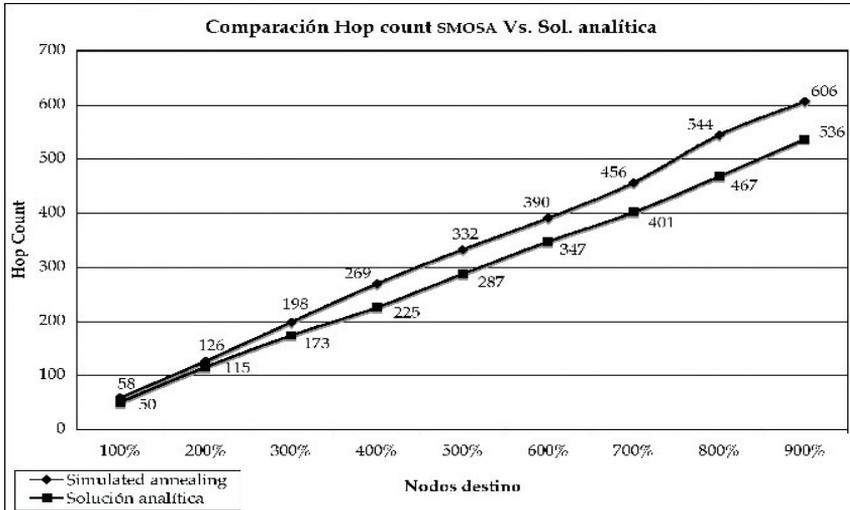


Figura 1

Comparación Hop count entre método matemático y método heurístico SA.

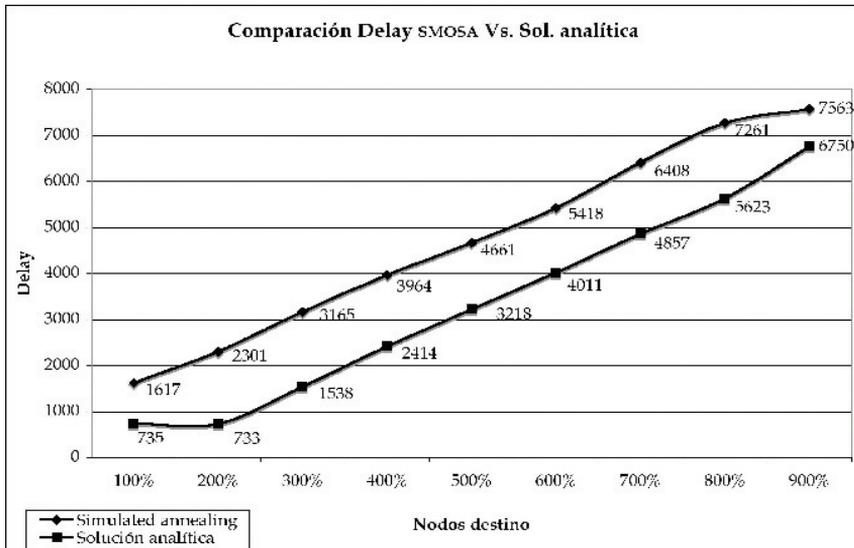


Figura 2

Comparación Delay entre método matemático y método heurístico SA.

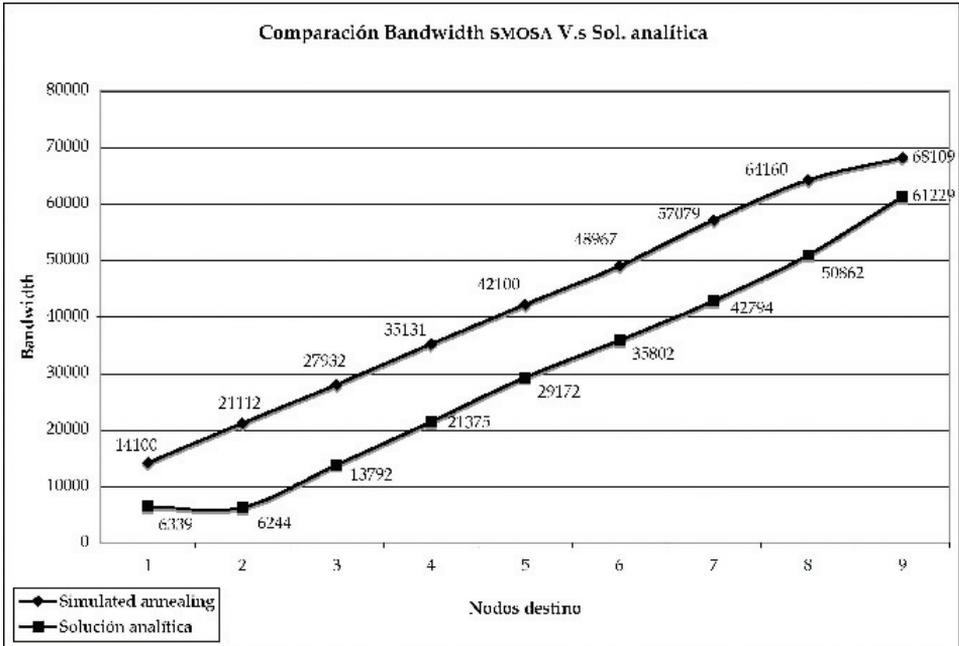


Figura 3
Comparación Bandwidth Consumption entre método matemático y método heurístico SA

CONCLUSIONES

Se puede notar que el comportamiento de ambos (modelo matemático y SMOSA) es muy parecido, demostrando así que la heurística *Simulated Annealing* (Recocido simulado) es una herramienta eficaz para la búsqueda de óptimos globales en un problema multiobjetivo.

Dada su naturaleza heurística, *Simulated Annealing* presenta un margen de error relativamente significativo para el que toma la decisión, pero se demuestra que puede llegar a ser también muy cercano al óptimo buscado.

Los resultados de la solución analítica, al ser obtenidos de un método matemático, podemos afirmar que son valores que se acercan con gran confiabilidad al óptimo global.

REFERENCIAS

- AARTS, E.H.L. (1989). *Simulated Annealing and Boltzmann Machines: a Stochastic Approach to Combinatorial Optimization and Neural Computing*. New York, Wiley.
- BALAKRISHNAN, V.K. (1995). *Network Optimization*. London, Chapman & Hall.
- BARAN, B., DUARTE, S. (1997). Multiobjective network design optimization using parallel evolutionary algorithms. San Lorenzo (Paraguay), Universidad Nacional de Asunción.
- CERNY, V. (1985). "Thermodynamical Approach to the Traveling Salesman Problem: An Efficient Simulated Algorithm", *Journal of Optimization Theory and Applications*, vol. 45, 41- 45.
- DEYUN, G., SHUO, Y.L., YANG, O.W.W. & YANTAI, Sh. Delay-based adaptive load balancing in MPLS networks. ICC 2002.
- KENNETH C., M. (1998). *Multicast Networking and applications*. United States, Addison Wesley.
- KIRPATRICK, S., GELATT, C.D. Jr. & VECCHI, M.P. (1983). "Optimization by Simulated Annealing", *Science*, Vol. 220.
- PHAM, D.T. (2000). *Intelligent Optimisation Techniques: Genetic Algorithms, Tabu Search, Simulation Annealing and Neural Networks*. London, Springer.
- VAN LA ARHOVEN (1995). *Simulated Annealing: Theory and applications* (Mathematics and its applications, 37), United States, E. H. L. Arts.
- WITTMAN, R. & ZITTERBART, M. *Multicast Communication, Protocols and Applications*, United States, Morgan Kauffman Publishers.