

Redes de Sensores Inalámbricos Aplicadas a Optimización en Agricultura de Precisión para Cultivos de Café en Colombia

Wireless Sensor Networks Applied to Optimization in Precision Agriculture for Coffee Crops in Colombia

Fernando Aparicio Urbano-Molano ^a *

^a*Departamento de Telemática, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Calle 5 No. 4 - 70, Sede Tulcán, Popayán, Colombia*

Recibido: 26/05/2013; revisado: 7/06/2013; aceptado: 10/07/2013.

Urbano-Molano, F. A.: Redes de Sensores Inalámbricos Aplicadas a Optimización en Agricultura de Precisión para Cultivos de Café en Colombia. *Jou.Cie.Ing.* **5** (1): 46-52, 2013. ISSN 2145-2628.

Resumen

En este trabajo se presenta el diseño preliminar de una red de sensores inalámbricos para agricultura de precisión en cultivos de café en Colombia usando el estándar 802.15.4. La arquitectura del sistema consiste de: tres nodos que utilizan sensores para temperatura y humedad del suelo, temperatura de las hojas, radiación solar y flujo fotosintético usando un radio XBee 802.15.4; el nodo coordinador posee una estación climatológica y un módem GSM que se encarga de enviar la información a un servidor central. El diseño del sistema presentó un buen desempeño, aunque inicialmente se presentaron algunas pérdidas de datos entre los nodos sensores y el coordinador. A pesar de la situación, el diseño preliminar envió satisfactoriamente los datos al servidor localizado en la ciudad de Popayán, Colombia.

Palabras Claves: Redes de sensores inalámbricos (WSN), 802.15.4, agricultura de precisión, microcontrolador, PIC, nodo sensor.

Abstract

This paper presents a preliminary design of a wireless sensor network for precision agriculture in coffee crops in Colombia using the standard 802.15.4. The system architecture consists of: Three sensor nodes that use sensor for soil and temperature moisture, leaf temperature, solar radiation and Photosynthetic Photon Flux using an XBee 802.15.4 radio; Coordinator node with a climatological station and a GSM modem sending data to a data base server. The design system has good performance although it has some loss of data in the communications between nodes and coordinator. Even that, the preliminary desing was successful sending data to a database server located in Popayan, Colombia.

Keywords: Wireless sensor network (WSN), 802.15.4, precision agriculture, microcontroller, PIC, node sensor.

* Este proyecto fue financiado por Colciencias y el Ministerio de Agricultura de Colombia.

1. Introducción

La agricultura constituye una de las áreas donde puede y se están implementando las redes inalámbricas de sensores. Este tipo de tecnología favorece una reducción en el consumo de agua y pesticidas, contribuyendo a la preservación del entorno. Adicionalmente, pueden generar alertas sobre la llegada de heladas, inundaciones, incendios, etc. La agricultura de precisión cubre múltiples prácticas relativas a la gestión de cultivos y cosechas, árboles, flores y plantas, ganado, etc. Entre las aplicaciones más interesantes se encuentra el control de plagas y enfermedades. Por medio de sensores estratégicamente situados, se pueden monitorizar parámetros tales como la temperatura y la humedad relativa del suelo, la temperatura y humedad de las hojas, la radiación solar, con el fin de detectar rápidamente situaciones adversas y desencadenar los tratamientos apropiados. La gran ventaja del uso de esta tecnología es la detección a tiempo y la aplicación óptima de los pesticidas, únicamente en aquellas zonas donde resulta realmente necesario [1].

Colombia se ha caracterizado por producir el café con el mejor sabor. Su producción, según la Federación Nacional de Cafeteros, que es la entidad que representa a los productores internacionalmente, ha crecido un 26 por ciento con relación al 2011. Siendo el tercer país productor del grano, la federación ha fomentado en los cafeteros, la renovación de cultivos, la siembra de cafés especiales y orgánicos, entre otras estrategias.

En este contexto, es importante diseñar una red inalámbrica de sensores (WSN) para cultivos de Café, cuyos nodos sean pequeños con el menor consumo de potencia posible. Que puedan enviar la información a una estación de control, ubicada en los alrededores de las casas de habitación de las fincas (granjas) y que desplieguen la información de manera gráfica con el fin de ser fácilmente entendibles. A largo plazo, el estudio de los datos recolectados, permitirían analizar cual es el impacto de los diferentes parámetros, así como de los climas y microclimas, sobre la cosecha y que acciones se deben tomar, por ejemplo con respecto a los abonos y/o pesticidas que se deben utilizar, incluso si en ciertas épocas o condiciones se hace necesario el riego artificial.

Este trabajo está organizado de la siguiente manera: en la sección II, se presenta una descripción con los aportes más significativos de algunos trabajos relacionados con las WSN aplicadas a agricultura de precisión; en la sección III, se da una breve descripción de lo que es una WSN, en particular para el estándar 802.15.4;

en la sección IV, se describe el diseño preliminar de una WSN para agricultura de precisión para cultivos de café en Colombia; y finalmente, en la sección V, se presentan las conclusiones.

2. Trabajos Relacionados

En esta sección se presentan, algunos trabajos relacionados con las aplicaciones de redes de sensores inalámbricos a la agricultura de precisión.

Torre-Neto et al [2], presentan el diseño de una red de sensores inalámbricos para la irrigación en cultivos de cítricos en Brasil. El sistema piloto se desarrolló en seis hectáreas con el objetivo de evaluarlo en condiciones de campo. Los nodos sensores se encuentran separados una distancia de 50 m. Se utilizaron nueve nodos sensores, que constan de un sensor de temperatura LM35 y uno capacitivo para medir la humedad del suelo, todo procesado por un microcontrolador PIC16F88 de Microchip, enviando datos cada 15 minutos. El nodo actuador, posee características similares al anterior, pero con una válvula y medidores de flujo. Una Estación de Campo, recibe los datos provenientes de los nodos sensores en intervalos de una hora y tiene conectada una estación meteorológica, el alcance de las comunicaciones está estimado en 500 m, con el fin de poder transmitir hacia la estación base (servidor) quien procesa la información.

Jiang et al [3], presentan el diseño de un sistema remoto para el monitoreo de enfermedades, en particular las relacionadas con la mosca oriental de la fruta. Está basado en el uso de tecnologías de comunicaciones inalámbricas. El sistema reporta automáticamente en tiempo real las condiciones ambientales y atrapa las moscas. Los datos adquiridos se integran en una base de datos para realizar un censo y análisis posteriores. El sistema consiste de dos componentes, una plataforma de monitoreo remoto (RMP) que utiliza como base el microcontrolador MSP430F449 desarrollado por Texas Instruments, además se encarga transmitir el número de moscas que son atrapadas por un dispositivo diseñado para tal fin, adquiere los datos ambientales y envía toda la información a través de un teléfono móvil usando mensajes de texto mediante GSM hacia una plataforma de control (HCP). La función de ésta última, es recibir, almacenar, mostrar y analizar la base de datos en línea; además proporciona funciones como, entradas, alertas tempranas, entre otras. Basado en el monitoreo a largo plazo, la base de datos adquirida por el sistema, permitió que se pudiera analizar fácilmente la relación entre la dinámica de la población de la mosca de la fruta y

los cambios ambientales.

Anurag et al. [4], presentan el diseño de una red de sensores inalámbricos para agricultura de precisión, donde se miden y almacenan en un repositorio central los datos en tiempo real de las propiedades climatológicas y algunas ambientales. La arquitectura del sistema está compuesta de tres secciones diferentes - (a) los nodos sensores (b) la red inalámbrica mesh y (c) los componentes actuadores. Los sensores fueron seleccionados basados en las propiedades más adecuadas para la mayoría de cultivos comunes y se identificaron cuatro de esos atributos, pH, temperatura y humedad del suelo y conductividad eléctrica. La red de sensores se basa en el estándar IEEE 802.15.4 y los autores desarrollaron un nuevo algoritmo de ruteo estático apropiado para aplicaciones de sensado. El algoritmo mitiga la deficiencia del esquema de Ruteo Jerárquico inherente en la especificación ZigBee donde el algoritmo de direccionamiento CSKIP limita la posible profundidad de la topología de la red debido a la pérdida de direccionamiento. El algoritmo mantiene la topología de red jerárquica así asegura que el enrutamiento sea óptimo. Se proporcionan los algoritmos, tanto para direccionamiento como enrutamiento. Los componentes actuadores también son parte de una red mesh, los cuales son activados de manera inalámbrica para controlar la irrigación y la fertilización.

López-Riquelme et al. [5], describen la implementación de una red de sensores experimental en una empresa ecológica de hortalizas en la región de Murcia, al sur de España. Se presenta la topología de la red desplegada usando cuatro tipos de nodos (Suelo, Ambiente, Agua y el Gateway) que utilizan el microcontrolado MSP430F1611 de Texas Instruments programado con el sistema operativo TinyOS versión 2, algunos de ellos conectados a diferentes sensores distribuidos en el cultivo. Estos sensores pueden medir varias características del suelo tales como la temperatura, contenido volumétrico de agua en el suelo y la salinidad. El sistema también incluye una aplicación de monitoreo en tiempo real operando desde un computador colocado en las oficinas centrales de la granja. Las pruebas del sistema se hicieron en dos fases: primero en el laboratorio, para validar los requerimientos funcionales de los dispositivos desarrollados, las comunicaciones de la red y el consumo de potencia de los nodos, usando únicamente cuatro nodos para el caso de las subredes del suelo y la ambiental; la segunda en la granja para evaluar el desempeño funcional de los dispositivos, tales como el alcance, la robustez y la flexibilidad, usando 10 nodos sensores usando topología de estrella con nodo un coordinador (gateway). El sistema se implementó exi-

tosamente en un cultivo ecológico de brócoli (*Brassica oleracea*). El resultado fue una infraestructura simple de bajo costo y altamente segura para la obtención y almacenamiento de datos agronómicos sobre un área distribuida en ambientes de horticultura.

Azis et al. [6], presentan el desarrollo de un sistema que utiliza el microcontrolador MPS430, puede monitorear remotamente y predecir los cambios de nivel de temperatura en invernaderos agrícolas. Se desarrolló un sistema de monitoreo remoto usando sensores inalámbricos y la tecnología de servicio de mensajes cortos (SMS). El sistema tiene un mecanismo para alertar a los granjeros cuando existan cambios de temperatura en el invernadero, de esa manera se pueden tomar precauciones, debido a las alertas tempranas emitidas.

Mizkam et al. [7], presentan el diseño preliminar en desarrollo de una WSN para una aplicación de monitoreo de un cultivo de arroz. El sistema propuesto se comunica entre ellos con un bajo consumo de potencia con el fin de entregar los datos adquiridos. El objetivo principal de la arquitectura propuesta es satisfacer el factor crítico y más importante de una WSN, es cuál es el consumo de potencia. El sistema consiste de nodos sensores basados en un microcontrolador de bajo consumo, el PIC16F887 de Microchip, sensores semiconductores MEMS, módulo de comunicaciones basado en el protocolo ZigBeeTM y la energía es suministrada por un panel solar con óptima administración de potencia.

Terzis et al. [8], presentan el desarrollo e implementación de dos redes experimentales para el monitoreo del suelo en bosques urbanos, en Baltimore, MD, USA. Los nodos de estas redes usan un MicaZ de Crossbow, para recolectar los datos de temperatura y humedad del suelo, almacenándolos en una memoria local. Posteriormente, los datos sin procesar son recuperados incrementalmente por un nodo sensor Gateway y almacenados continuamente en una base de datos, que además le llegan también datos calibrados. La base de datos almacenada está disponible para aplicaciones de terceros a través de varias interfaces de servicios Web.

Aquino-Santos et al. [9], presentan la evaluación una plataforma de redes de sensores inalámbricos y sus aplicaciones en agricultura de precisión, incluyendo PaRTiKle, el sistema operativo embebido usado y el algoritmo de enrutamiento. Para validar la plataforma tecnológica y el sistema operativo embebido, se compararon dos estrategias diferentes de enrutamiento: jerárquica y plana. Ambos algoritmos fueron probados en una red de pequeña escala aplicada a un cultivo de melones. Los autores consideran que la aplicación tecnológica puede ser aplicable a la agricultura de precisión por que incorpora una versión modificada de LORA-CBF que

incluye una métrica para monitorear la energía de las baterías y un algoritmo de enrutamiento basado en localización que usa crecimiento basado en cluster.

3. Redes de Sensores Inalámbricos

3.0.1. Introducción

Una red de sensores inalámbricos (WSN) es un sistema que consiste de dispositivos autónomos usando sensores distribuidos espacialmente para monitorear cooperativamente condiciones físicas o ambientales, tales como temperatura, humedad relativa, radiación solar, flujo fotosintético, etc. en diferentes ubicaciones.

Las tecnologías inalámbricas, especialmente los sensores inalámbricos y las redes de sensores, los cuales integran diferentes tecnologías como: MEMs, comunicaciones inalámbricas, sistemas embebidos y administración de la información distribuida, han estado en continuo y rápido desarrollo. La transmisión inalámbrica puede reducir y simplificar el cableado, ubicar el sensor en sitios remotos y peligrosos, su instalación es fácil, de tamaño considerablemente pequeño, bajo consumo de potencia, integración a bajo costo y movilidad.

Actualmente, las WSN son usadas en varias áreas de aplicación industrial, incluyendo monitoreo de procesos y control, salud, ambiente y hábitat, aplicaciones de control, domótica, control de tráfico y monitoreo agrícola.

3.1. IEEE 802.15.4

Es un estándar que define la capa física (PHY) y el control de acceso al medio (MAC) para redes inalámbricas de área personal (WPAN) con bajas tasas de transmisión de datos. Hace énfasis en el bajo costo de la comunicación con los nodos cercanos y sin infraestructura o con muy poca, para favorecer aún más el bajo consumo.

En la figura 1, se observan las capas inferiores del modelo OSI, ya que el estándar se concentró en desarrollarlas. Para las capas superiores hay dos opciones: la especificación ZigBee y 6LowPAN.

3.2. Topologías de red

La topología se refiere a la manera como son distribuidos los componentes hardware de la WSN y a la manera cómo los datos son transmitidos por la red. Se debe analizar, cuál es la topología más apropiada que se ajuste a las necesidades específicas para cada aplicación.

El estándar IEEE 802.15.4 define dos tipos de dispositivos: el Full Function Device (FFD) y el Reduced Function Device (RFD). El FFD contiene el conjunto completo de los servicios MAC y puede operar como coordinador PAN (Personal Area Network) o como un simple dispositivo de red. El RFD contiene un conjunto reducido de servicios MAC y puede operar únicamente como un dispositivo de red.

Hay dos topologías permitidas, aunque el estándar no define un nivel de red, ya que las funcionalidades de las capas superiores están por fuera del estándar [10]. Las redes en estrella, se forman alrededor de un FFD que actúa como coordinador, quien es el único permitido para formar enlaces con más de un dispositivo. Las redes punto a punto, donde cada dispositivo está habilitado para formar múltiples enlaces directos a otros, y su extensión está limitada únicamente por la distancia existente entre cada par de ellos.

4. Diseño de la Red de Sensores Inalámbricos

Los microsensores son una solución para mejorar la agricultura. Para este caso se han acoplado a un sistema usando un Red Inalámbrica de Sensores (WSN). La denominada agricultura de precisión podría ayudar en el aumento de la producción de café, ahorrar los costos de la cosecha y proteger el cafetal contra el abuso de pesticidas y fertilizantes.

El sistema de sensores debe utilizar la mínima cantidad de energía posible mientras opera sobre un amplio rango de escenarios. El consumo de energía debe tener gran escalabilidad en todos los niveles del sistema, incluyendo el procesamiento de señales, el sistema operativo, los protocolos de red, y los mismos circuitos integrados.

4.1. Arquitectura de la red WSN propuesta

La arquitectura de la red está basada en un nodo coordinador (o *gateway*), que se encarga de recolectar los datos provenientes de cada nodo sensor (ver figura 2) y transmite los datos vía GPRS a un servidor central. Los nodos sensores, son aquellos que procesan y transmiten al nodo coordinador la información de los sensores. Se propone el uso de una topología en estrella, debido a que inicialmente la red prototipo tiene únicamente tres nodos sensores.

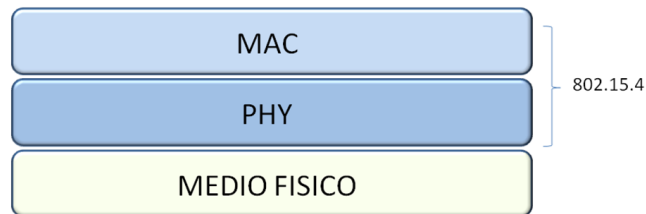


Figura 1. Pila de Protocolos para el Estándar 802.15.4

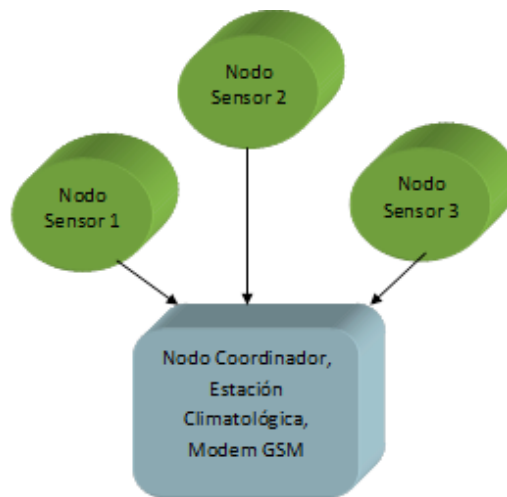


Figura 2. Arquitectura de la WSN propuesta

4.2. Arquitectura del Nodo Sensor

El núcleo central del nodo sensor, es un microcontrolador PIC 24 de MicrochipTM, cuyas entradas son los sensores de temperatura y humedad del suelo, flujo fotosintético, temperatura en las hojas (radiómetro) y radiación solar. La adquisición de estas señales incluye un filtro promedio, con el fin de garantizar mejor precisión en las variables entregadas. Adicionalmente, el sistema está conectado a un reloj de tiempo real y una memoria sd card.. La salida de los datos se hace mediante USART hacía el receptor/transmisor XbeeTM IEEE 802.15.4 que actúa como RFD.

4.3. Arquitectura del Nodo Coordinador

La arquitectura del nodo coordinador es similar a la del nodo sensor, pero con la diferencia que en éste van conectados los sensores de la estación climatológica que tiene adicionalmente un módulo XbeeTM Pro en modo FFD, que se encarga de recibir o captar la información de los nodos sensores y enviar una trama en conjunto con los datos climatológicos, a través de un módem GSM al servidor PC, para procesar y desplegar la información sobre Internet (ver figura 3).

4.4. Comunicaciones

La comunicación y las actividades de la red iniciarán operación después de que el microcontrolador lea todos los valores de los conversores analógico-digitales



Figura 3. Nodo Coordinador implementado



Figura 4. Nodo Sensor implementado

desde la salida de voltaje de los sensores y lo enviará a un registro de la memoria RAM. Los sensores digitales tipo I2C transmitirán las lecturas después del reconocimiento de los bits enviados por el microcontrolador. El módulo Xbee TM opera dentro de la banda de los 2.4 GHz y opera con un voltaje DC de 3.3V (2.8-3.4) a una potencia máxima de transmisión de 0dBm @ 1mW,

45mA mientras que el Xbee TM Pro da una mejor transmisión a un rango superior a 18 dBm @60mW a 225 mA. Este módulo es compatible con el estándar IEEE 802.15.4 tiene un rango de 216 direccionamientos de red únicos, los cuales son capaces de construir topologías punto a punto y multipunto. Este módulo se programa usando comandos AT y con el software X-CTU

proporcionado libremente por los fabricantes [11].

4.5. Implementación de la WSN

El nodo coordinador se instaló, en el mismo soporte de una estación climatológica existente, con el fin de poder realizar una verificación y comparación de los datos meteorológicos enviados al servidor y realizar las respectivas calibraciones (ver figura 3).

En la figura 4, se muestra uno de los nodos sensores implementados en el cultivo de café. La red prototipo tiene hasta el momento, tres nodos sensores para evaluar el desempeño de los sistemas diseñados.

Tanto el nodo coordinador como los nodos sensores, fueron fabricados por la empresa *Microhardsoft SAS*.

5. Conclusiones

En este trabajo se presenta una revisión preliminar sobre algunos trabajos relevantes de la agricultura de precisión, así como los principios básicos de una red de sensores inalámbricos, aplicada a la optimización en agricultura de precisión, en particular a los cultivos de café en Colombia.

Se presentaron los sistemas diseñados y se afianzó en las redes WSN, de manera más profunda y con mayor claridad. En este contexto, se evaluó el diseño de la red, encontrando algunos problemas técnicos en las transmisión de datos, dado que a pesar de haber adquirido unos módulos de comunicaciones, con unas buenas características, debido a las condiciones a que fueron sometidos, hay pérdidas de paquetes y por lo tanto, se hace necesario replantear la topología de la red WSN implementada, así como el protocolo de transmisión de datos.

En una versión mejorada, se planea evaluar otras topologías, empezando con punto a punto, mesh, etc. Con el fin de encontrar la alternativa más apropiada. Cabe resaltar, que inicialmente, no se propuso aplicar ningún protocolo de enrutamiento y por tanto, es necesario a futuro tener en cuenta este aspecto.

Agradecimientos

El autor expresa su agradecimiento al Grupo de Ingeniería Telemática (GIT) y al de Estudios Ambientales (GEA) de la Universidad del Cauca.

Un agradecimiento muy especial a Ana Diedrichs (UTN - Facultad Regional Mendoza - Argentina) y Guillermo Riva (UTN - Facultad Regional Córdoba - Argentina), quienes colaboraron en la revisión del diseño preliminar de la red.

Referencias

- [1] R. Fernández Martínez, J. B. Ordieres Meré, F.J. Martínez de Pisón Ascacíbar, A. González Marcos, F. Alba Elías, R. Lostado Lorza, et al. Redes inalámbricas de sensores: Teoría y aplicación práctica. page 95, 2009.
- [2] A. Torre-Neto, R.A. Ferrarezi, D.E. Razera, E. Speranza, W.C. Lopes, T. Lima, L.M. Rabello, and C.M.P. Vaz. Wireless sensor network for variable rate irrigation in citrus. In *FRUIT, NUT AND VEGETABLE PRODUCTION ENGINEERING SYMPOSIUM, 7th-INFORMATION & TECHNOLOGY FOR SUSTAINABLE FRUIT & VEGETABLE PRODUCTION*, volume 7, pages 563–569, 2005.
- [3] J.A. Jiang, C.L. Tseng, F.M. Lu, E.C. Yang, Z.S. Wu, C.P. Chen, S.H. Lin, K.C. Lin, and C.S. Liao. A gsm-based remote wireless automatic monitoring system for field information: A case study for ecological monitoring of the oriental fruit fly, *bactrocera dorsalis* (hendel). *Computers and electronics in agriculture*, 62(2):243–259, 2008.
- [4] D. Anurag, S. Roy, S. Bandyopadhyay, and I. Kolkata. Agrosense: precision agriculture using sensor-based wireless mesh networks. In *Innovations in NGN: Future Network and Services, 2008. K-INGN 2008. First ITU-T Kaleidoscope Academic Conference*, pages 383–388, 2008.
- [5] JA López Riquelme, F. Soto, J. Suardiaz, P. Sánchez, A. Iborra, and JA Vera. Wireless sensor networks for precision horticulture in southern spain. *Computers and Electronics in Agriculture*, 68(1):25–35, 2009.
- [6] I.A. Aziz, M.H. Hasan, M.J. Ismail, M. Mehat, and N.S. Haron. Remote monitoring in agricultural greenhouse using wireless sensor and short message service (sms). *International Journal of Engineering & Technology IJET*, 9(9), 2009.
- [7] MA Miskam, AB Nasirudin, and IA Rahim. Preliminary design on the development of wireless sensor network for paddy rice cropping monitoring application in malaysia. *European Journal of Scientific Research*, 37(4):649–656, 2009.
- [8] A. Terzis, R. Musaloiu-E, J. Cogan, K. Szlavecz, A. Szalay, J. Gray, S. Ozer, C.J. Liang, J. Gupchup, and R. Burns. Wireless sensor networks for soil science. *International Journal of Sensor Networks*, 7(1):53–70, 2010.
- [9] R. Aquino-Santos, A. González-Potes, A. Edwards-Block, and R.A. Virgen-Ortiz. Developing a new wireless sensor network platform and its application in precision agriculture. *Sensors*, 11(1):1192–1211, 2011.
- [10] C. Buratti, A. Conti, D. Dardari, and R. Verdone. An overview on wireless sensor networks technology and evolution. *Sensors*, 9(9):6869–6896, 2009.
- [11] Digi International. *XBee®/XBee-PRO® OEM RF Modules*. Minnetonka, MN, USA., 2008.