

MÉTODO DE OPTIMIZACIÓN PARA EL BALANCE DE CARGA EN LA RED WCDMA DE ETECSA

Daniela Alvarez Aguilar, Oliver Pantoja Cassola

¹ETECSA, Edif. Barcelona 3er piso, 5ta ave / 76 y 78 Playa,

² ETECSA, Edif. Barcelona 3er piso, 5ta ave / 76 y 78 Playa

¹e-mail: daniela9539@nauta.cu

²e-mail: oliver.pantoja@cubacel.cu

RESUMEN

En el presente trabajo se propone un algoritmo de balance de carga para redes WCDMA. El balance de carga se logra con la modificación del área de cobertura de una celda, mediante el ajuste cuidadoso de la potencia destinada al canal piloto (CPICH, Common Pilot Channel). Para decidir cuánto y cuándo variar la potencia del CPICH el algoritmo utiliza una serie de reglas basadas en lógica difusa. El algoritmo fue validado en la red WCDMA de La Habana, la cual no contaba con un mecanismo capaz de analizar la carga de cada celda en la red y proponer los cambios necesarios para distribuir la carga. Como resultados se obtuvieron el balance de la carga, el aumento en la capacidad y la disminución en la congestión en la celda optimizada.

PALABRAS CLAVES: Redes WCDMA, optimización, balance de carga, potencia del canal piloto

OPTIMIZATION METHOD TO BALANCE LOADS ON ETECSA'S WCDMA NETWORK

ABSTRACT

In this paper, an algorithm to balance loads for WCDMA networks is proposed. The load balancer is achieved by modifying the covered area of a given cell. This by carefully adjusting the power allocated of pilot channels (CPICH, Common Pilot Channel). To decide how much and when to vary the power of CPICH, the algorithm uses a series of rules based on fuzzy logic. The algorithm was validated in Havana's WCDMA network, which did not have a mechanism capable of analyzing loads of each cell on networks. Then to propose changes to distribute loads properly. Results obtained were the load balance, the increase in capacity and the decrease in congestion on the optimized cell.

KEY WORDS: WCDMA networks, optimization, load balance, pilot channel power.

1. INTRODUCCIÓN

En las redes móviles, debido a la variación en tiempo y espacio de los usuarios, existe desbalance en cuanto a tráfico y carga. Es común tener sitios en la red que a horas determinadas del día o en determinados días de la semana, manejen un tráfico considerable, mientras que otros sitios cercanos a estos se encuentren con poca carga. A estos puntos de concentración de tráfico se les conoce como HotSpots (puntos de acceso de mayor tráfico), y generalmente son las responsables de comportamientos negativos en la red.

Para analizar el comportamiento de la red se utilizan los KPI (Key Performance Indicators), que son indicadores de desempeño seleccionados por el operador, los más comunes son: accesibilidad, retenibilidad y disponibilidad; aunque también se analizan: congestión, índice de inaccesibilidad y tasa de llamadas caídas. Actualmente existen diversos estudios dedicados a la optimización de diferentes parámetros de acceso en redes WCDMA (Wideband Code Division Multiplex Access) con el objetivo de mejorar diferentes KPI.

En [1-3] se utilizan algoritmos genéticos para aliviar los HotSpots de la red y eliminar el desbalance de carga, en los tres artículos la optimización se logra mediante el ajuste dinámico de cobertura de las celdas. Sin embargo, en [1, 3] se utiliza la potencia del canal piloto como parámetro a optimizar, mientras que en [2] es el patrón de la antena el parámetro de interés. En los artículos anteriores se demuestra que la utilización de los algoritmos genéticos puede ser una solución casi óptima para distribuir los recursos de radio en redes móviles, pues resultan ser rápidos y eficientes.

En [4-7] se presentan varios algoritmos para la optimización de la potencia del CPICH y la inclinación de las antenas, la decisión de cuando incrementar/disminuir estos parámetros es basada en reglas definidas de antemano. Específicamente en [4, 6] la carga de la celda se mide mediante el porcentaje de utilización de la potencia en el downlink (enlace de bajada), mientras que en [5, 7] el análisis se basa en la calidad de la señal al borde de la celda y en el porcentaje de llamadas bloqueadas y/o caídas respectivamente.

En [8], también se presenta un algoritmo basado en reglas, pero que es capaz de optimizar la red en varios escenarios. Este algoritmo se realiza periódicamente y, además de resolver los problemas de balance de carga básicos, es capaz de mejorar las situaciones de sobrecarga debido a la contaminación del piloto (pilot pollution); para esto analizan diversos parámetros e indicadores de desempeño de la red como son: utilización de potencia en el enlace descendente (downlink), niveles de interferencia en el enlace ascendente (uplink), calidad de la señal en el borde de la celda, etc. En estos casos los algoritmos basados en reglas obtienen resultados positivos pues muestran mejoras en la reducción de la contaminación del piloto y aumento de la capacidad, sin necesidad de dedicar muchos recursos en el proceso de optimización.

En [9-14] se logra la optimización de la red mediante la utilización de la Lógica Difusa (Fuzzy Logic). En estos artículos se implementan Controladores de Lógica Difusa (FLC, Fuzzy Logic Controller), con el objetivo de variar automáticamente parámetros específicos por celdas en dependencia de los niveles de carga que estas manejen. En los artículos [10, 13], se propone utilizar los FLCs para optimizar los parámetros de handover en redes heterogéneas. En [11, 12, 14] se utiliza FLC para optimizar los parámetros específicos de

cada celda involucrados en el proceso de soft/softer handover, en dependencia de los niveles de carga que manejan las mismas. A diferencia de los algoritmos basados en regla tradicionales, al utilizar lógica difusa se alcanzan mejores resultados en intervalos de tiempo menores.

En todos los artículos mencionados anteriormente se alcanzan los resultados deseados. Sin embargo, para que el algoritmo sea adecuado a las condiciones actuales de la red WCDMA de La Habana debe cumplir con los requisitos siguientes:

- Bajo costo de implementación
- Simple
- Preciso
- Rápido

Para tomar las decisiones, el mecanismo más sencillo y rápido en converger a una solución, es utilizar un algoritmo basado en reglas que utilicen lógica difusa. Por lo tanto, se propone un algoritmo basado en reglas que utiliza lógica difusa para modificar el área de cobertura, asignando valores diferentes para cada celda en dependencia de la carga que estas manejan. El método seleccionado en este caso para variar el área de cobertura de una celda es la modificación de la potencia del canal piloto.

1. DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO

El algoritmo de optimización propuesto tiene como objetivo ajustar el área de cobertura de un conjunto de celdas, para lograr transferir varios dispositivos móviles (UE, User Equipment) desde un HotSpot hacia sus celdas vecinas menos cargadas, balanceando la carga. Por ejemplo, en la figura 1 (a) se muestra en rojo una celda HotSpot y en azul sus celdas vecinas menos cargadas; si la cobertura de la celda roja se reduce también se reduce su carga, pues pierde a los usuarios que se encuentran al borde de la celda, los cuales son los que generalmente le aportan mayor carga al sistema. En este caso, si es necesario se extenderá el área de cobertura de las celdas vecinas para cubrir las áreas fuera de servicio después de la reducción de cobertura de la celda HotSpot, como se muestra en la figura 1 (b).

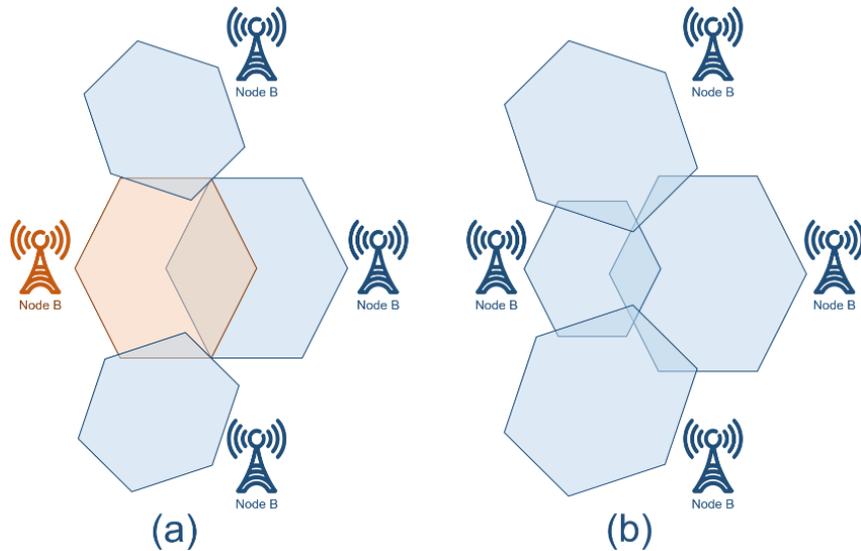


Figura 1: Áreas de cobertura, (a) Escenario desbalanceado, (b) Escenario Balanceado.

Este algoritmo se compone de tres pasos o etapas principales, las cuales se muestran en el diagrama de flujo siguiente.

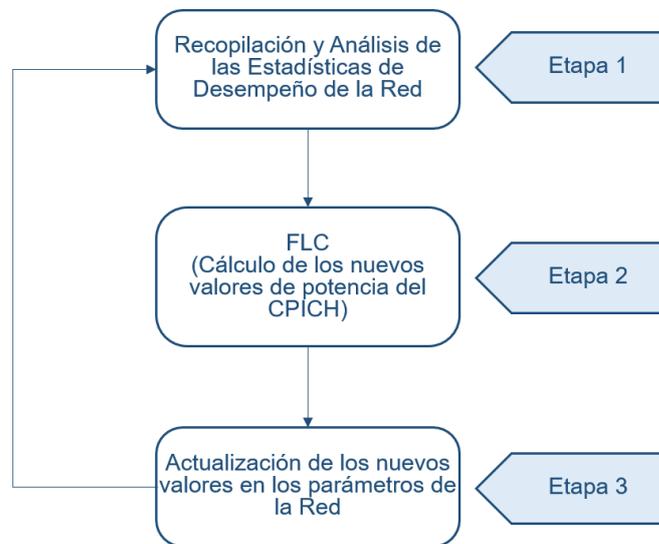


Figura 2: Diagrama de flujo del algoritmo propuesto.

Etapas 1: Recopilación y el análisis de las estadísticas de la red

En esta etapa el operador de la red será capaz de identificar y localizar los HotSpots dentro de la red y seleccionar el escenario a optimizar. Las estadísticas de la red son todos los datos y/o eventos ocurridos en la red que son de interés para el operador, los cuales son almacenados en una base de datos. Debido a que la potencia asignada a una celda WCDMA

debe ser compartida por todos los usuarios activos a esa celda, incluidos los que se encuentran conectados mediante soft/softer handover [15], el indicador seleccionado para medir la carga de cada celda dentro de la red en este trabajo, será el consumo de potencia en el downlink. Este indicador se puede calcular mediante la ecuación (1) [16]:

$$Power_Load = \frac{Potencia\ actual\ consumida}{Máxima\ Potencia\ que\ es\ capaz\ de\ entregar\ la\ celda} \quad (1)$$

En este algoritmo será necesario recoger periódicamente las estadísticas de consumo de potencia en el downlink y posteriormente analizarlas en búsqueda de las celdas más cargadas de la red. Para calcular el valor de carga de una celda se examinará el comportamiento del consumo de potencia durante toda una semana.

Para analizar el consumo de potencia durante toda una semana y seleccionar el escenario a optimizar, se utilizan la función de densidad de probabilidad y la función de distribución acumulativa:

- Función de densidad de probabilidad (pdf, Probability Density Function): Es la probabilidad de que una fracción de una población determinada se encuentre dentro de un rango dado [17, 18]:

$$Prb(a \leq x \leq b) = \int_a^b pdf(x) dx \quad (2)$$

- Función de distribución acumulativa (cdf, Cumulative Distribution Function): Es la probabilidad de que una fracción de una población determinada tome valores menores que x dentro de una distribución [17]:

$$cdf(x) = Prb(X \leq x) \text{ para } -\infty < x < \infty \quad (3)$$

$$cdf(x) = \int_{-\infty}^x pdf(t) dt \quad (4)$$

Las celdas candidatas a ser clasificadas como HotSpots, y por lo tanto a optimizar, serán las que tengan la mayor probabilidad de que su consumo de potencia este por encima del 50%, o sea, $Power_Load \geq 0.5$. Para buscar estas celdas se utilizó la función de distribución acumulativa (cdf). El valor de la cdf para el 50% del consumo de potencia dará como resultado el porciento de muestras que se obtuvieron por debajo de este valor, como el total de muestras que se pueden obtener es 100%.

El objetivo es saber cuántas muestras se encuentran por encima del 50% del consumo de potencia; entonces, el porciento de muestras por encima del 50% del consumo de potencia se podrá calcular como $100\%_de_muestras - cdf(50\%)$. Después de seleccionada la celda a optimizar será necesario realizar una búsqueda entre todas sus vecinas y seleccionar una para la optimización. El parámetro a tener en cuenta para seleccionar la celda vecina entre todas las celdas que tienen relaciones de vecindades con los HotSpots será el índice de handovers. Este parámetro será la relación entre los intentos de handover hacia/desde una vecina determinada y el total de intentos de handovers que ocurren en el HotSpot.

Este valor fue seleccionado debido a que ofrece una medida de cuál será la frontera más cargada del HotSpot, pues si se disminuye la cobertura del HotSpot será la vecina que tenga mayor índice de handovers la que más carga asumirá. Es por esta razón que será necesario

analizar los niveles de carga de la celda con más índice de handovers, para conocer si un incremento en el número de usuarios que ella maneja normalmente traería consecuencias negativas. Por último, el valor de carga seleccionado para cada celda será el que coincida con el 85% de las muestras recolectadas, es decir $\text{cdf}(\text{valor de carga}) = 85\%$ de las muestras, este valor será la entrada al FLC para cada una de las celdas seleccionadas.

Etapa 2: Cálculo de los nuevos valores de potencia del CPICH

El segundo paso en el algoritmo de optimización lo constituye el cálculo de los nuevos valores de potencia del CPICH para las celdas seleccionadas. Para realizar este cálculo se utilizará un Controlador de Lógica Difusa (FLC), que tendrá como entradas la carga del HotSpot y la carga de la celda vecina. Como salida el FLC tendrá el incremento/decremento que deberá realizarse a la potencia del CPICH para cada una de estas celdas, de forma que se alcance el balance de carga entre las celdas seleccionadas.



Figura 3: Esquema del controlador de lógica difusa.

CPICH

Para que un UE acampe y se mantenga en una celda, debe ser capaz de demodular los siguientes canales físicos pertenecientes a dicha celda: SCH, CPICH y PCCPCH. La demodulación de cualquiera de estos canales depende de su potencia asignada, las condiciones del canal y el rendimiento del UE.

Debido a que el CPICH es uno de los canales necesarios para que un UE acceda a la red, y es monitorizado constantemente por este. Los valores medidos se comparan con los umbrales emitidos para evaluar la necesidad de re-selección de celda o handover, o para declarar ocasiones de área fuera de servicio, lo que indica que el UE se encuentra fuera del área de cobertura [16]. Ç

Sería natural utilizar el CPICH para definir el área de cobertura de una celda, por lo que incrementar/disminuir la potencia de este canal traería como consecuencia un incremento/reducción del área de cobertura de la celda cuyo CPICH fue modificado. Además, la potencia asignada a los demás canales físicos se expresa como una función de la potencia asignada a este canal. Por lo que una disminución/aumento en la potencia del CPICH significaría una disminución/aumento en la potencia destinada a los demás canales físicos de control. Por tanto, una ventaja de variar este parámetro está dado por la relación entre la disminución de la potencia dedicada al CPICH significa una disminución en la potencia utilizada por todos los demás canales comunes. Lo cual tiene como consecuencia un aumento en la potencia asignada a los canales dedicados, y por lo tanto un aumento en la capacidad de la celda. [19]

Lo usual es asignar al CPICH valores de potencia entre el 5% y el 20% de la potencia total disponible en el transmisor. Sin embargo, Ericsson recomienda que este parámetro no sea modificado en intervalos mayores a 3dB. Por tanto, la restricción establecida por este

algoritmo para restringir la potencia del CPICH es que no debe ser menor que el 5%, ni mayor que el 20% de la potencia máxima que puede entregar el transmisor. Además, las variaciones realizadas no deben exceder los 3dB.

Diseño del FLC

El centro del algoritmo de optimización lo compone un FLC, y es en este paso donde se toma la decisión de si variar o no la potencia del CPICH, y en cuantas unidades debe realizarse esta variación. La lógica difusa es una herramienta matemática diseñada para trabajar con información imprecisa. Esta técnica simula la inteligencia humana, puesto que es capaz de trabajar con representaciones lingüísticas como son: mucho, poco, medio, bajo, alto, etc. Estos sistemas son muy útiles en dos contextos generales:

- En situaciones que involucran sistemas muy complejos cuyos comportamientos no se comprenden bien.
- En situaciones donde se justifica una solución aproximada, pero rápida y sencilla [20, 21].

Para el diseño e implementación del controlador de lógica difusa se utilizó la aplicación Matlab, fuzzyLogicDesigner, la cual permite diseñar un Sistema de inferencia Difusa (FIS), de una manera simple y amigable para el usuario. El FLC diseñado es de tipo Sugeno, cuenta con dos entradas, cada una con 3 regiones lingüísticas diferentes, y una salida.

Se definieron 6 reglas para la toma de decisiones y el método de defuzzificación utilizado es el método del Promedio Ponderado (Weighted Average). Se seleccionó un FIS del tipo Sugeno debido a que es más simple computacionalmente y conveniente para problemas de optimización. Las dos entradas del FLC serán la carga de la celda seleccionada a optimizar y la carga de su vecina escogida para realizar el balance. La salida del FLC será el incremento/decremento que deberá realizarse al área de cobertura. Es importante aclarar que el incremento/decremento que se obtiene a la salida es con respecto a la celda seleccionada a optimizar, a la vecina deberá realizársele la acción contraria.

En ambas entradas las funciones de membresía utilizadas fueron funciones de Gauss, debido a que la repercusión de los niveles de carga en el comportamiento de una celda varía de forma exponencial. Las funciones de membresía son funciones matemáticas utilizadas para indicar el grado de pertenencia de un elemento de entrada a un conjunto determinado [20, 21]. En la siguiente figura se muestran las funciones de membresía para una de las entradas (ambos conjuntos son iguales).

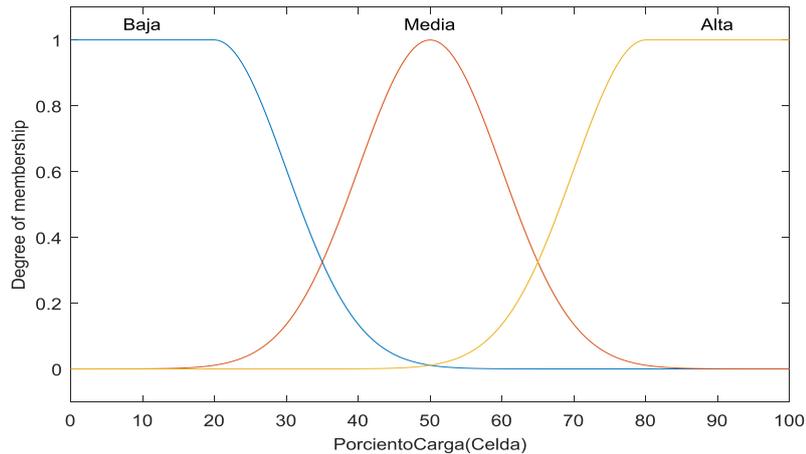


Figura 4: Funciones de membresía para la entrada "Carga HotSpot".

En la siguiente tabla se muestra un resumen de las reglas implementadas en el FLC. Estas reglas fueron implementadas mediante sentencias IF-THEN con operadores AND como conectores.

Tabla 1: Reglas implementadas en el FLC.

Carga Celda/Vecina	Baja	Media	Alta
Baja	Nulo	+1	+3
Media	-1	Nulo	+1
Alta	-3	-1	Nulo

En la siguiente figura se muestra el rango de posibles valores que puede tomar la salida del FLC. La principal diferencia entre un sistema basado en reglas “precisas” y un sistema basado en reglas “difusas” es esta salida. En los sistemas precisos se obtienen salidas discretas, mientras que con los sistemas difusos se pueden obtener a la salida un rango continuo de valores. Como se puede apreciar en la figura, en este caso el rango de posibles valores abarca todo el intervalo desde -3 hasta +3.

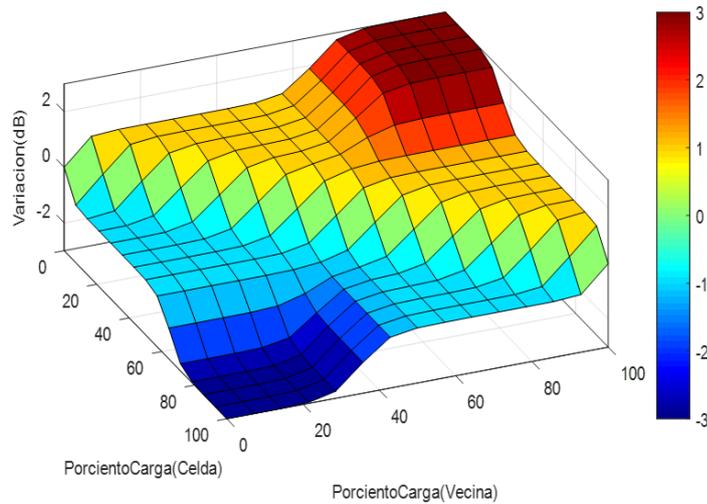


Figura 5: Rango de valores que se pueden obtener a la salida del FLC.

Etapa 3: Actualización de los valores calculados en la red

En esta etapa los nuevos valores de los parámetros optimizados son actualizados en la red. Después de realizado este paso, será necesario monitorizar el escenario modificado para conocer el impacto que tuvo el proceso de optimización en el comportamiento de estas celdas. Por último, se vuelve a ejecutar el algoritmo para optimizar un nuevo HotSpot, hasta lograr el balance de carga en toda la red.

Evaluación práctica del algoritmo propuesto

Para la evaluación practica del algoritmo se seleccionó la celda HCH2836 la cual se encuentra ubicada en La Habana y es de tecnología Ericsson. Se analizó el desempeño de esta celda y todas sus vecinas durante un período de dos semanas, desde el 15 de mayo hasta el 28 de mayo de 2018, una semana antes del cambio y una semana después del cambio. Los valores de potencia del CPICH propuestos fueron actualizados en la celda HCH2836 el día 21 de mayo de 2018 a las 22:00 horas. En este caso se tomó la decisión de no modificar el valor de la celda vecina, pues este escenario presenta solapamiento excesivo entre sus celdas, y es muy baja la probabilidad de dejar zonas sin servicio.

Las celdas seleccionadas para analizar en el FLC fueron:

- HCH2836 (HotSpot): nivel de carga del 84%.
- HCH2006 (Vecina): nivel de carga del 44%.

Tabla 2: Valores de la potencia del CPICH propuestos.

Celda	Valor Inicial	Valor Propuesto	% de la Potencia Total
HCH2836	32.5 dBm	31.3 dBm	6.8%

Resultados obtenidos:

El primer resultado a analizar será el nivel de carga para la celda HCH2836 antes y después del día 22 de mayo. En la Tabla 3.8 se muestra una comparación entre los niveles de carga de la celda seleccionada, antes y después del proceso de optimización; como se puede observar el cambio fue considerable pues la carga disminuyó desde el 84% hasta el 64%.

Tabla 3: Comparación entre los niveles de carga de la celda HCH2836.

SITIO	CHAPA	Antes del 22 de Mayo	Después del 22 de Mayo
AGUILACT	HCH2836	84%	64%

A continuación, se muestran una serie de gráficos con el comportamiento de los indicadores seleccionados a medir. Se mostrarán los resultados desde el 17 hasta el 26 de mayo, la celda optimizada, HCH2836, siempre se mostrará en color rojo oscuro.

En la figura 6 se muestra el comportamiento de la congestión por potencia para las peores celdas dentro del grupo de celdas seleccionadas. En este caso no se consideraron las celdas que presentaron muy pocos o ningún evento de congestión. El impacto en este indicador es notable, debido a que la congestión de la celda optimizada pasó de tener entre 300 y 200 eventos de congestión a tener 0 eventos, sin que aumentaran los niveles de congestión en el clúster.

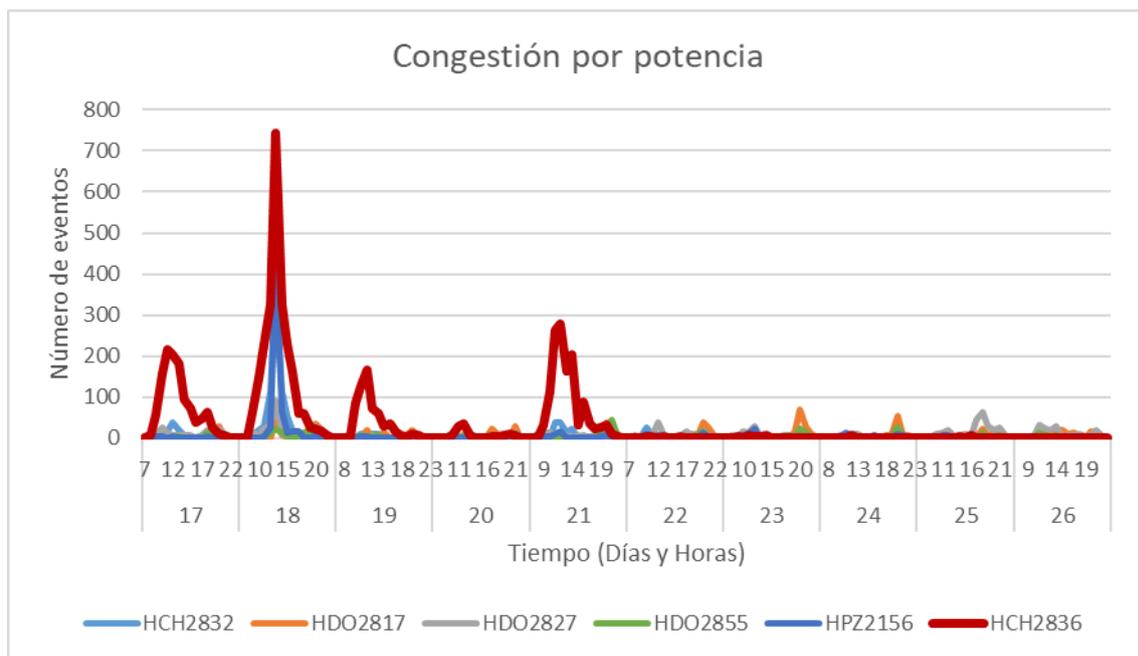


Figura 6: Niveles de congestión por potencia.

En la figura 7 se muestra el comportamiento del tráfico CS y PS total de todo el clúster. En el caso de este indicador no se observa ningún cambio. Este resultado es positivo pues no se perdió tráfico después de variar la cobertura de la celda HCH2836, lo cual significa que no se dejaron áreas sin servicio después de realizado el cambio. Sin embargo, el comportamiento de las celdas HCH2836 y HCH2832 fue bastante interesante.

En la figura 8 se puede observar que el tráfico en la celda HCH2836 (a la cual se le disminuyó la cobertura) incrementa notablemente, mientras que en la celda HCH2832

disminuye el tráfico. Este comportamiento se debe a que al disminuir la potencia del CPICH, disminuye también la potencia dedicada a los demás canales comunes, por lo que aumenta la potencia destinada a los canales de tráfico y por lo tanto la capacidad de la celda. Además, al disminuir la cobertura, los usuarios que estaban anteriormente en el borde de la celda son redistribuidos entre las celdas vecinas. Los usuarios que se encuentran en la frontera son los que más potencia consumen en las celdas, pues debido a la distancia a la que se encuentran, tanto el transmisor como el UE deben transmitir con más potencia para mantener una calidad aceptable en la comunicación. Por tanto, al liberar los usuarios al borde de la celda disminuye la potencia consumida en esta y la interferencia en el uplink generada por los UE, por lo que aumenta su capacidad y puede admitir más tráfico.

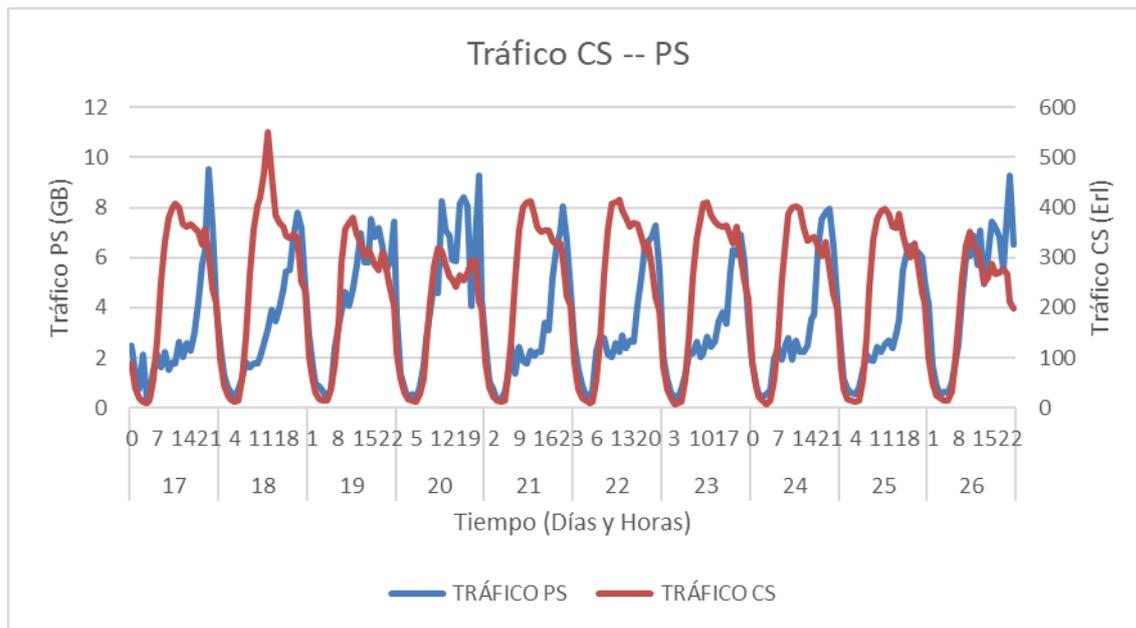


Figura 7: Tráfico CS y PS en el clúster.

En la figura 7 se muestra el comportamiento del tráfico CS y PS total de todo el clúster. En el caso de este indicador no se observa ningún cambio, este resultado es positivo pues no se perdió tráfico después de variar la cobertura de la celda HCH2836, lo cual significa que no se dejaron áreas sin servicio después de realizado el cambio. Sin embargo, el comportamiento de las celdas HCH2836 y HCH2832 fue bastante interesante. En la figura 8 se puede observar que el tráfico en la celda HCH2836 (a la cual se le disminuyó la cobertura) incrementa notablemente, mientras que en la celda HCH2832 disminuye el tráfico.

Este comportamiento se debe a que al disminuir la potencia del CPICH, disminuye también la potencia dedicada a los demás canales comunes, por lo que aumenta la potencia destinada a los canales de tráfico y por lo tanto la capacidad de la celda. Además, al disminuir la cobertura, los usuarios que estaban anteriormente en el borde de la celda son redistribuidos entre las celdas vecinas. Los usuarios que se encuentran en la frontera son los que más potencia consumen en las celdas, pues debido a la distancia a la que se encuentran, tanto el transmisor como el UE deben transmitir con más potencia para mantener una calidad

aceptable en la comunicación. Por lo tanto, al liberar los usuarios al borde de la celda disminuye la potencia consumida en esta y la interferencia en el uplink generada por los UE, por lo que aumenta su capacidad y puede admitir más tráfico.

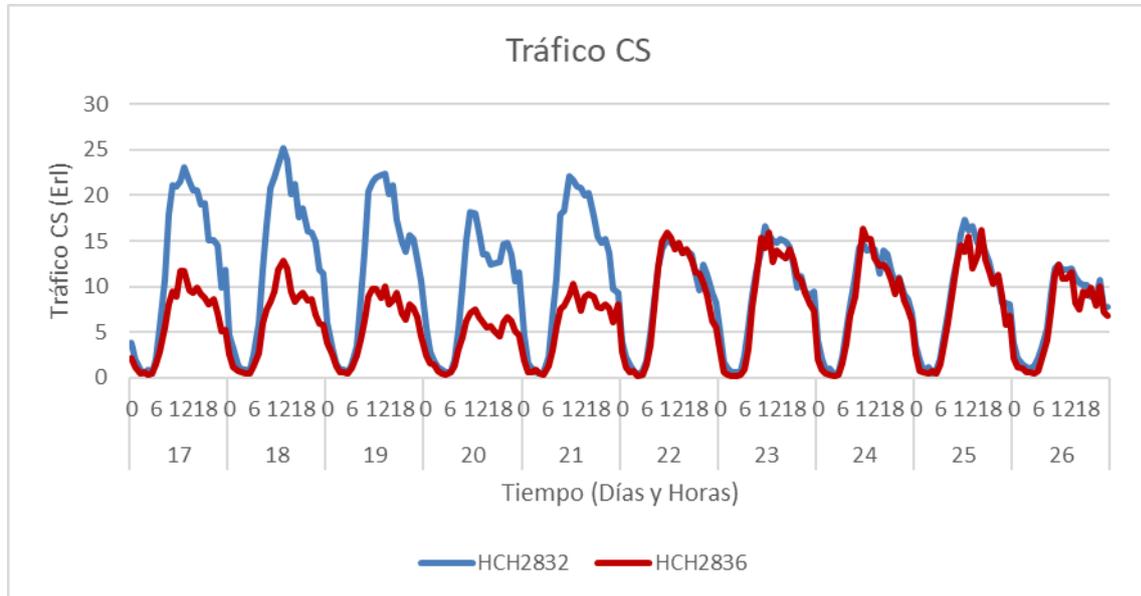


Figura 8: Tráfico CS.

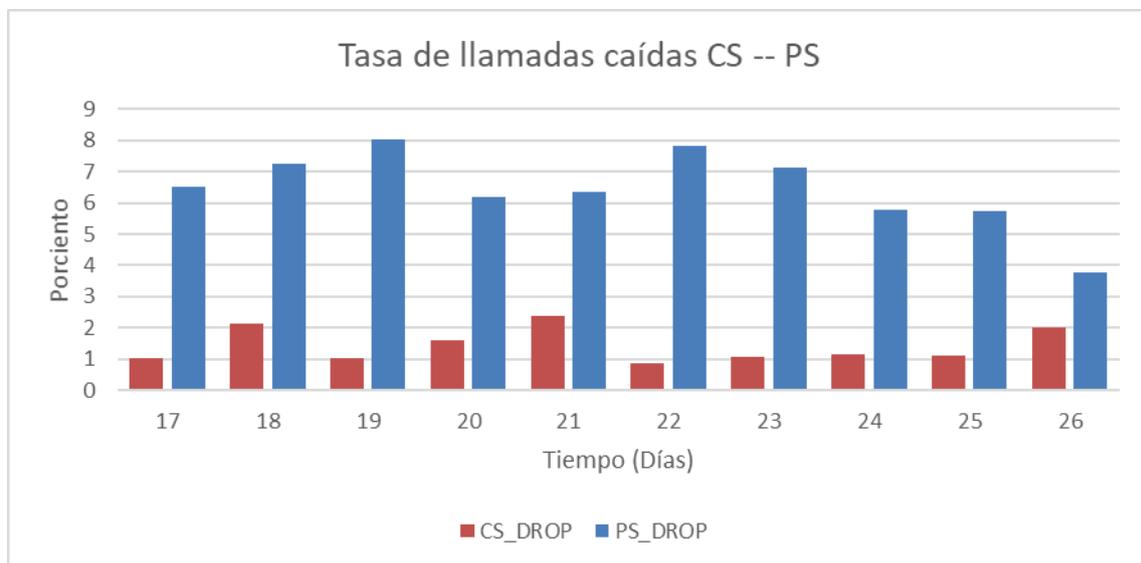


Figura 9: Tasa de llamadas caídas.

En la figura 9 se muestra la tasa de llamadas caídas para la celda HCH2836. En este caso la tasa de llamadas caídas de tipo CS se mantuvo por debajo del 2.5%, umbral de calidad establecido por ETECSA. Sin embargo, la tasa de llamadas caídas tipo PS se encuentra por encima del umbral establecido del 3.5%. Este indicador no varió debido al proceso de optimización, es decir siempre estuvo por encima de este umbral y requiere un análisis diferente.

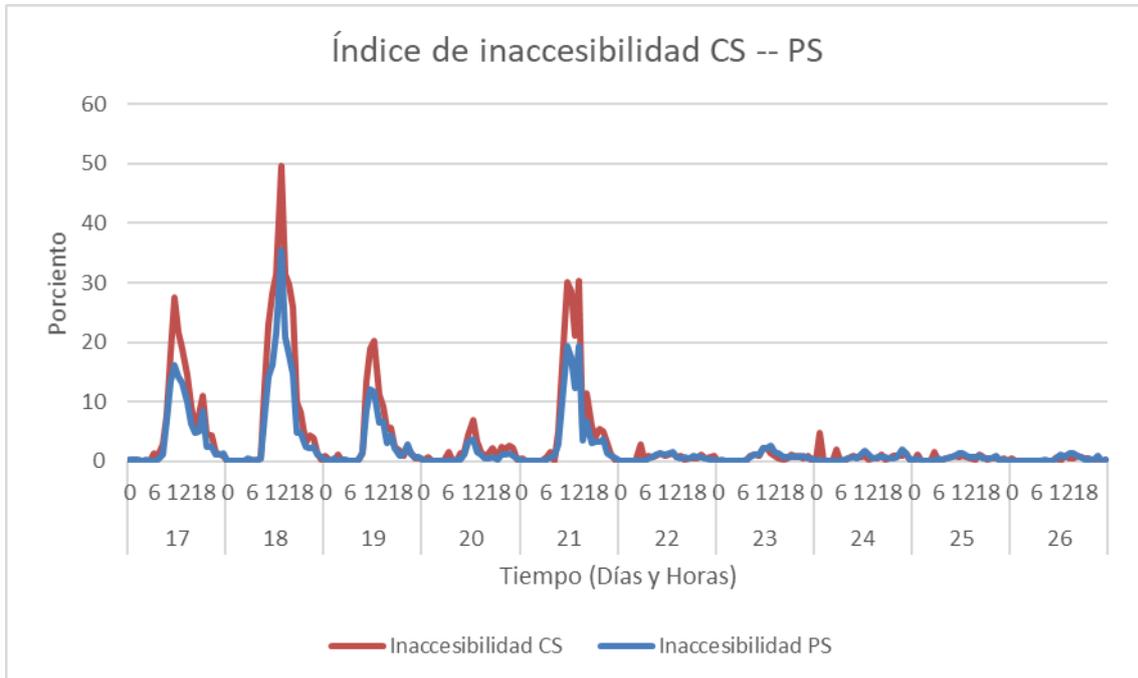


Figura 10: Índices de inaccesibilidad.

Por último, se analizarán los índices de inaccesibilidad para el tráfico CS y PS. En la figura 10 se muestra el impacto que tuvo el proceso de optimización en estos indicadores para la celda HCH2836. El índice de inaccesibilidad de una celda expresa la probabilidad que existe de que un UE inicie una conexión RRC (Radio Resource Control) y esta sea descartada debido a la falta de recursos. Los umbrales de calidad establecidos por ETECSA para estos indicadores son: para la inaccesibilidad CS el 3%, para la inaccesibilidad PS el 3.96%. Evidentemente el impacto en estos indicadores fue considerable, debido a que antes del día 22 ambos se encontraban por encima de los umbrales permisibles, con valores entre el 20% y el 30% y máximos del 50%. Una vez aplicado el proceso de optimización estos valores se encuentran por debajo del 3%, por lo que la accesibilidad mejoró considerablemente.

CONCLUSIONES

El algoritmo propuesto satisface su objetivo, debido a que se logró balancear la carga entre las celdas de todo el clúster y se eliminaron los niveles de congestión. Además, no existieron cambios negativos en el desempeño de la red después de aplicado el algoritmo y se obtuvieron beneficios adicionales como son: el aumento de la capacidad y la disminución de los índices de inaccesibilidad hasta entrar dentro del rango permitido para la celda HCH2836.

REFERENCIAS

1. Alenoghena, C., J. Emagbetere, and F. Edeko, "Application of Genetic Algorithm in Radio Network Coverage Optimization-A Review". *International Journal of Computer Applications*, 2013. 66 (12).
2. Du, L., et al. "Cell size and shape adjustment depending on call traffic distribution". in *Wireless Communications and Networking Conference, 2002. WCNC2002. 2002 IEEE. 2002. IEEE*.
3. Gao, M., et al. "Intelligent coverage optimization with multi-objective genetic algorithm in cellular system". in *Computer Science & Education (ICCSE), 2013 8th International Conference on. 2013. IEEE*.
4. Gerdenitsch, A., et al., "A Rule-Based Algorithm for Common Pilot Channel and Antenna Tilt Optimization in UMTS FDD Networks". *ETRI journal*, 2004. 26(5): p. 437-442.
5. Hoglund, A. and K. Valkealahti. "Quality-based tuning of cell downlink load target and link power maxima in WCDMA". in *Vehicular Technology Conference, 2002. Proceedings. VTC 2002-Fall. 2002 IEEE 56th. 2002. IEEE*.
6. Höglund, A. and K. Valkealahti, "Automated optimization of key WCDMA parameters". *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2005. 5(3): p. 257-271.
7. Love, R.T., et al. "A pilot optimization technique for CDMA cellular systems". in *Vehicular Technology Conference, 1999. VTC 1999-Fall. IEEE VTS 50th. 1999. IEEE*.
8. Mfula, H., T. Isotalo, and J.K. Nurminen. "Self-optimization of power parameters in WCDMA networks". in *High Performance Computing & Simulation (HPCS), 2015 International Conference on. 2015. IEEE*.
9. Avilés, J.M.R., et al. "Analysis of load sharing techniques in enterprise LTE femtocells". in *Wireless Advanced (WiAd), 2011. 2011. IEEE*.
10. Luna-Ramirez, S., et al. "Inter-system handover parameter auto-tuning in a joint-RRM scenario". in *Vehicular Technology Conference, 2008. VTC Spring 2008. IEEE. 2008. IEEE*.
11. Muñoz, P., R. Barco, and I. de la Bandera, "Optimization of load balancing using fuzzy Q-learning for next generation wireless networks". *Expert systems with applications*, 2013. 40(4): p. 984-994.
12. Nasri, R., "Auto-tuning and Self-optimization of 3G and Beyond 3G Mobile Networks". 2009, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI.
13. Nasri, R., A. Samhat, and Z. Altman. "A new approach of UMTS-WLAN load balancing; algorithm and its dynamic optimization". in *World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks, 2007. WoWMoM 2007. IEEE International Symposium on a. 2007. IEEE*.
14. Werner, C., et al. "Handover parameter optimization in WCDMA using fuzzy controlling". in *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2007. PIMRC 2007. IEEE 18th International Symposium on. 2007. IEEE*.
15. Laiho, J., A. Wacker, and T. Novosad, "Radio Network Planning and Optimisation for UMTS". Second Edition ed. 2006: John Wiley & Sons.
16. Holma, H. and A. Toskala, "WCDMA for UMTS: Radio Access for Third Generation Mobile Communications". 2004: John Wiley & Sons.

17. DeGroot, M.H. and M.J. Schervish, "Probability and statistics". 2012: Pearson Education.
18. Silverman, B.W., "Density estimation for statistics and data analysis". 2018: Routledge.
19. ERICSSON, "Power Control WCDMA RAN User Description". 2014.
20. Ross, T.J., "Fuzzy logic with engineering applications". 2009: John Wiley & Sons.
21. The_Math_Works_Inc., "Fuzzy Logic Toolbox MatLab Help". 2016.

SOBRE LOS AUTORES

Daniela Alvarez Aguilar, Ingeniera en Telecomunicaciones y Electrónica graduada en julio 2018. Adiestrada asignada a ETECSA para el cumplimiento del servicio social.

Oliver Pantoja Cassola, Ingeniero en Telecomunicaciones y Electrónica, Jefe de Departamento de Administración de la Red, DVSM, ETECSA. Actualmente se desempeña al frente del grupo de optimización de la red de telefonía móvil en todo el país.