



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

METODOLOGÍA DE ADMINISTRACIÓN DE PROYECTOS DE
INFRAESTRUCTURA EN TELECOMUNICACIONES BASADO
EN LA TEORÍA DE RESTRICCIONES

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO

P R E S E N T A:

ARTURO MACÍAS CASTAÑEDA



DIRECTOR DE TESIS:
ING. BENJAMÍN RAMIREZ

MÉXICO, D.F. 2014



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

Esta tesis te la dedico a ti, tía Blanquita.
Gracias por estar siempre ahí en ese momento preciso.

A toda mi familia por el cariño que siempre me ha brindado y por estar conmigo en todos los logros de vida. En especial a mis padres Arturo y Lulú y a mis hermanos Malena y Alonso quienes son siempre mi primer apoyo.

Agradezco a todas las personas que han sido parte de mi desarrollo académico y profesional que forman parte de mí y que representan una parte de este trabajo.

Al Ing. Benjamín Ramírez por el gran apoyo que me brindó a lo largo de este proceso.

A Emilio Becerra, de quien aprendí de Administración de Proyectos y que ha sido una guía importante en mi desarrollo profesional.

A mi tío Miguel que me ayudó a entender muchos conceptos de Teoría de Restricciones y de Cadena Crítica.

A los compañeros de Carso en México, Honduras, Costa Rica, Colombia, Ecuador, Perú, Brasil, Argentina y Uruguay de quienes aprendí, entre otras cosas, de construcción de redes y de telecomunicaciones.

A todos mis amigos y amigas, que día a día construyen aventuras, emociones, sentimientos y virtudes que conforman a esta persona y que son el gran soporte de mi vida.

Índice

Objetivo.....	6
Introducción.....	6
i Perspectiva histórica de las telecomunicaciones.....	7
ii Conceptos generales.....	11
Capítulo 1. Obras de infraestructura en telecomunicaciones.....	16
1.1. Contexto actual de las telecomunicaciones en México.....	16
1.2. Ingeniería y construcción de obras en telecomunicaciones.....	18
1.2.1 Redes de telefonía.....	26
1.2.2. Redes de acceso.....	28
1.2.3. Redes Híbridas Coaxial-Fibra Óptica (HFC).....	30
1.2.4. Radio bases de telefonía móvil.....	31
Capítulo 2. Administración de proyectos basado en la Teoría de Restricciones.....	32
2.1 Política de administración de proyectos según el PMI.....	32
2.2 Teoría de Restricciones y administración de proyectos por Cadena Crítica.....	40
2.3 Gestión de proyectos para obras de telecomunicaciones.....	47
2.3.1 Construcción de red de telefonía.....	55
2.3.2 Construcción de red de acceso.....	62
2.3.3 Construcción de red HFC.....	66
2.3.4 Construcción de radio base.....	70
Capítulo 3. Modelo de proyecto para obras de telecomunicaciones.....	74
3.1 Modelo y simulación de un proyecto de construcción en telecomunicaciones.....	74
3.1.1 Proyecto de construcción de red telefónica.....	75
3.1.2 Proyecto de construcción de red de acceso.....	82
3.1.3 Proyecto de construcción de red HFC.....	88
3.1.4 Proyecto de construcción de radio base.....	93
3.2. Presentación y discusión de resultados.....	100
Conclusiones.....	102
Bibliografía.....	103
Tabla de figuras.....	104

Objetivo.

El objetivo de esta tesis es proponer una metodología para la administración de proyectos de construcción en telecomunicaciones. Los fundamentos de la metodología están basados en la Teoría de Restricciones propuesta por Eliyahu M. Goldratt¹.

Introducción.

El panorama actual de las comunicaciones en México y el mundo muestra un escenario de gran competencia y dinamismo para las empresas que construyen obras de telecomunicaciones. Esta situación les requiere implementar nuevas prácticas de administración de proyectos con las cuales incrementen su rentabilidad e impulsen el desarrollo de la industria. Debido a la naturaleza de la operación en este tipo de proyectos, se ha visto la posibilidad de asociar ciertos factores y condiciones similares a los que se presentan en procesos industriales de otras ramas y otros sectores económicos. De esta manera es factible aplicar los fundamentos de la Teoría de Restricciones para desarrollar una metodología que permita gestionar los proyectos de obra en telecomunicaciones con un enfoque de *proceso de operación* pero con las características esenciales de un *proyecto de construcción*. Con este modelo, se buscó optimizar el uso de las herramientas de gestión y hacer más eficientes los procesos operativos para impulsar la rentabilidad de este tipo de negocios.

En este trabajo se describe la ingeniería para la construcción de redes de fibra óptica (FO), redes híbridas coaxial-fibra óptica (HFC) y telefonía celular. Se describen los fundamentos de la Administración de Proyectos tradicional y los principios de Teoría de Restricciones y Cadena Crítica. Se propone una aplicación de la Teoría de Restricciones en los procesos de administración de proyectos utilizados en la construcción de redes de comunicaciones. Se realiza un análisis de los tiempos, los costos y los cumplimientos de alcance asociados a los diferentes tipos de obras. Finalmente se ejemplifica la metodología de administración de proyectos empleando la Teoría de Restricciones y se comentan los resultados obtenidos.

¹ (Goldratt, La Meta: Un Proceso de Mejora Continua, 2005).

i Perspectiva histórica de las telecomunicaciones.

En un principio las telecomunicaciones se limitaban al teléfono y la radio, ahora las telecomunicaciones abarcan la transmisión de voz, video y datos, siendo el Internet un pilar importante en el impulso del desarrollo de la industria. La revolución informática que trajo consigo el desarrollo de las comunicaciones ha marcado el desarrollo de otras industrias al grado de que actualmente el comercio, las actividades productivas y el uso cotidiano de estos servicios en las sociedades están basados en un esquema de información y comunicación.

La era de las comunicaciones electrónicas se inicia con la invención del telégrafo en la década de 1830s. En aquellos años se inventaron técnicas de codificación como lo fue el *Código Morse* que alcanzaba una tasa de transferencia (velocidad de transferencia de datos) de $B \approx 10[b/s]$. La primera línea trasatlántica de telégrafo se puso en operación en 1866².

Diez años después se inventó el teléfono en 1876, el científico canadiense Graham Bell (1847-1922) inventa el primer medio de comunicación moderno que consiste en intercomunicar dos dispositivos fijos mediante un par de cables conductores (el par telefónico). Este hecho trajo consigo un desarrollo importante de la industria, que duraría gran parte del siglo XX. En 1940 se puso en operación el primer sistema de cable coaxial, en una frecuencia de $f = 3 [MHz]$ era capaz de transmitir 300 canales de voz o uno de video. El cable coaxial fue fundamental en las comunicaciones de la segunda mitad del siglo XX, incluso hoy en día son base importante de una parte de las redes de comunicación, sin embargo, debido a las propiedades físicas del cable las pérdidas de señal en frecuencias superiores a los $f = 10 [MHz]$ impiden su operación en ese espectro³.

Poco después del cable coaxial surgieron los sistemas de comunicación por microondas. Su origen data de 1887, cuando el físico alemán Heinrich Hertz (1857-1894) descubre las ondas de radio. En 1896, el físico italiano Guglielmo Marconi (1874-1937) realiza la primera transmisión de radio. El primer sistema de microondas se puso en operación en 1948, transmitía a una frecuencia $f = 4 [MHz]$. Sin embargo fue hasta la década de 1950s cuando la empresa Bell Telephone ofrece a pequeños grupos de abonados por primera vez un servicio de radio telefonía. Las siguientes tres décadas fueron de desarrollo para la telefonía móvil. En 1978 la compañía Bell Telephone propone el sistema *AMPS* (por sus siglas en inglés, *Advanced Mobile Phone Service*) que posteriormente fue normalizado en EUA en 1982. En el mismo año, la *Conférence Européene des Administrations des Potes et Télécommunications (CEP)* crea el *Groupe Spécial Mobile (GSM)* quienes elaboran las normas europeas para la radiocomunicación con los móviles donde se definen, entre otras cosas, la banda de 890 – 915 $[MHz]$ para la emisión de estaciones móviles.

² (Huidobro, 2006)

³ (Agrawal, 2002)

Tanto el cable coaxial como las microondas evolucionaron a lo largo de los años operando a tasas de bits de $B \approx 100 [Mb/s]$ ⁴.

Es común utilizar una forma normalizada de la tasa de bits B por unidad de longitud $[km]$ expresada como el producto $BL [(bit/s) km]$, donde B es la tasa de bits y L es la distancia o espacio de repetición.

En 1960, con el surgimiento del láser se comenzó a desarrollar tecnología que empleara ondas ópticas como portadoras para transmisión de señales. En 1966 se sugirió el uso de cables de fibra óptica para la transmisión de señales, pero las pérdidas en los cables ópticos de aquella época eran importantes $\sim 1000 [dB/km]$ ⁵. En 1970 se consiguió reducir las pérdidas por debajo de los $20 [dB/km]$ en la región de longitud de onda cercana a $\lambda = 1000 [nm]$. Simultáneamente se demostró la operación continua de los láseres semiconductores de GaAs. Esta coyuntura desencadenó, a partir de 1975 y por los siguientes 30 años, un desarrollo acelerado de las comunicaciones ópticas duplicando los valores de $BL [(B/s)km]$ anualmente. Se distinguen cuatro fases en el desarrollo de las comunicaciones ópticas, cada una ellas representa un cambio fundamental⁶.

Primera fase

La primera fase de las comunicaciones ópticas contempló sistemas que operaban en la banda de $850 [nm]$ y utilizaban láser semiconductor de GaAs en fibras ópticas multimodo, MMF (multi-mode fiber)⁷. Estos sistemas se comenzaron a comercializar en 1980, operaban a una tasa de transferencia de 34 a $45 [Mbit/s]$ y el espacio de repetición llegaba a los $10 [km]$, en comparación con los espacios de repetición en sistemas coaxiales que eran $\sim 1 [km]$. La Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU, por sus siglas en inglés) como el organismo especializado de las Naciones Unidas para las tecnologías de la información y la comunicación, normó por primera vez en 1988 la construcción y operación de las redes ópticas de primera generación⁸.

Segunda fase

La segunda fase se considera a partir de la puesta en operación de sistemas ópticos basados en láser semiconductor de InGaAsP en la banda de $\lambda = 1300 [nm]$. En este espectro las pérdidas de

⁴ (Agrawal, 2002). En 1975 se puso en operación un sistema coaxial que operaba con una tasa de bits $B = 274 [Mb/s]$. Una desventaja de estos sistemas coaxiales de alta velocidad es la distancia de repetición ($\sim 1 [km]$) que los hace relativamente costosos en la operación.

⁵ (Agrawal, 2002).

⁶ (ITU, 2010).

⁷ Los tipos de fibra óptica y sus características se describen en el Capítulo 1.

⁸ (ITU, 2010). La recomendación ITU-T G.651 especifica las características de la fibra óptica multimodo operando a $850 [nm]$. La ITU-T G.955 especifica los sistemas a $850 [nm]$ empleando tecnología PDH (jerarquía digital pliesiónica).

la fibra óptica son menores a 1 [dB/km], aunado a esto las fibras ópticas presentan mínima dispersión en esta región. Las tasas de transferencia en MMF de segunda generación alcanzaban los 100 [Mbit/s], estando limitadas por la dispersión multimodo. En esta fase surgieron las fibras ópticas monomodo SMF (single-mode fiber) y para 1988 se comenzaron a comercializar sistemas de segunda generación operando a tasas de transferencia de $B = 1.7$ [Gb/s] y espacios de repetición de ~ 50 [km]⁹.

Tercera fase

La tercera fase de las comunicaciones ópticas se considera a partir de la operación de sistemas ópticos con SMF en la banda de 1550 [nm]. La principal ventaja de los sistemas en 1550 [nm] es su bajo nivel de atenuación. Típicamente el coeficiente de atenuación en los sistemas a 1550 [nm] es de 0.2 [dB], en comparación con la atenuación que presentan los sistemas a 1300 [nm] que es de 0.5 [dB]. Sin embargo la dispersión en SMF en esta banda es mayor, lo que propició el desarrollo de fibras monomodo DSF (dispersion-shifted fiber) con mínima dispersión. En 1992 se comenzaron a comercializar sistemas ópticos de tercera generación operando a 2.5 [Gb/s]. Estos sistemas son capaces de transmitir hasta 10 [Gbit/s] en fibras DSF y con láseres oscilando en un solo modo longitudinal¹⁰.

Cuarta fase

Se considera la cuarta fase de las comunicaciones ópticas a partir del surgimiento de dos tecnologías: el amplificador óptico, que incrementó dramáticamente el espacio de repetición; y el multiplexado por división de longitud de onda WDM (wavelength division multiplexing) que incrementó la tasa de transferencia considerablemente. A partir de 1990 se comenzaron a comercializar sistemas WDM con amplificadores ópticos operando en la llamada banda C (1530 a 1565 [nm]) llegando a tasas de transferencia de $B = 2.5$ [Gb/s] sobre una distancia de 21,000 [km] y en 1991 una tasa de transferencia $B = 5$ [Gb/s] sobre una distancia de 14,300 [km]. Para 1996 se demostró una tasa de transferencia de 5 [Gb/s] sobre 11,600 [km] de cable submarino. Esta fase de los sistemas ópticos también considera la puesta en operación de sistemas comerciales trasatlánticos y transpacíficos, y cables submarinos todo alrededor del mundo¹¹.

⁹ (ITU, 2010). La recomendación ITU-T G.652 especifica las características de la fibra óptica monomodo operando a 1300 [nm]. La ITU-T G.957 especifica los sistemas a 1300 [nm] empleando tecnología SDH (jerarquía digital síncrona) hasta STM-16. La ITU-T G.955 fue extendida para incluir sistemas PDH operando a 1300 [nm].

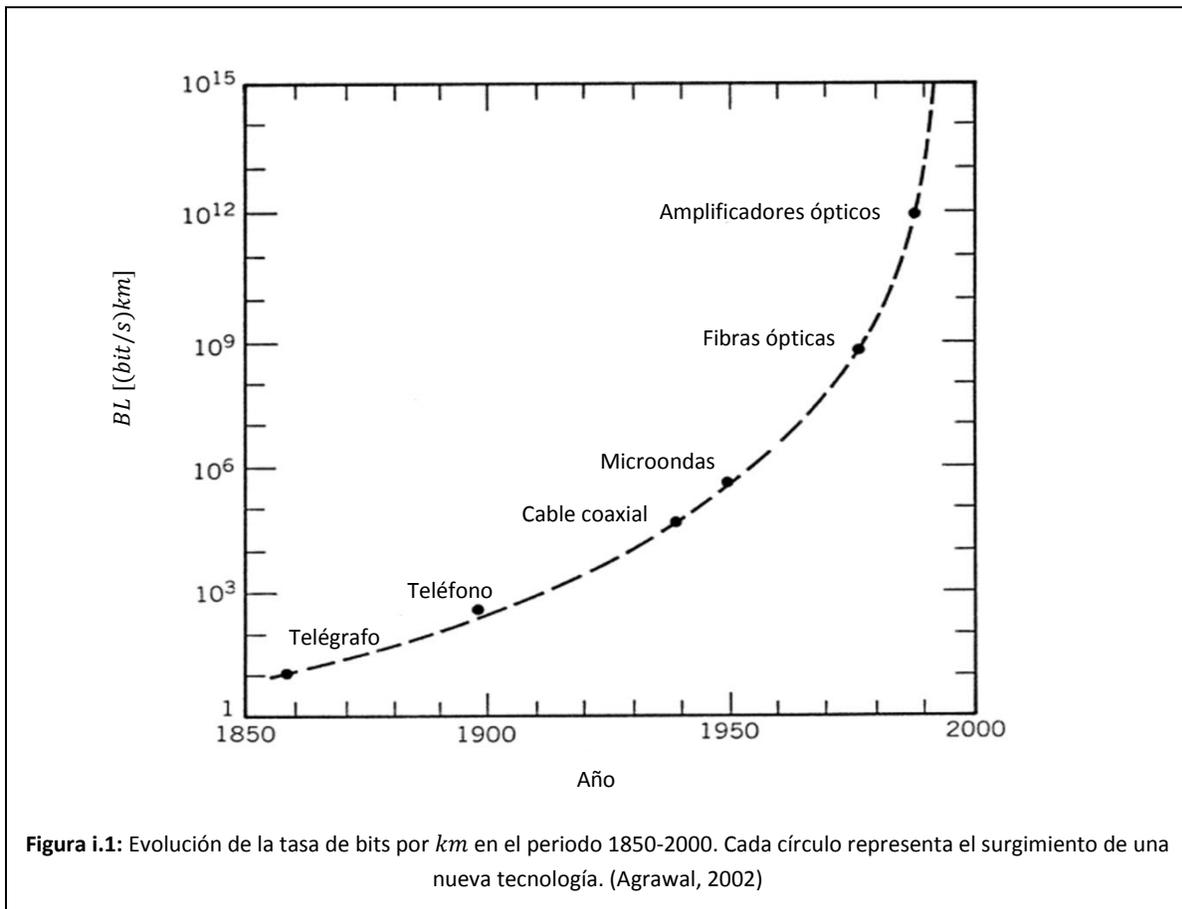
¹⁰ (ITU, 2010). La recomendación ITU-T G.653 especifica las características de la fibra óptica monomodo DSF operando a 1550 [nm]. La ITU-T G.652, ITU-T G.955 y ITU-T G.957 fueron extendidas para incluir sistemas a 1550 [nm].

¹¹ (ITU, 2010). La recomendación ITU-T G.655 especifica las características de la fibra óptica monomodo NZDSF (*non-zero dispersion-shifted fiber*) operando en la banda C. Otras recomendaciones que especifican sistemas de cuarta generación referentes a aplicaciones DWDM y CWDM son ITU-T G.694.1 y ITU-T G.694.2 respectivamente.

La ITU establece como la quinta fase al desarrollo actual de sistemas de última generación con varias direcciones de desarrollo, poniendo especial atención a temas como:

- Sistemas de larga distancia, en relación al incremento de la capacidad de transmisión en las fibras ópticas.
- La reducción de conversiones *O/E/O* (*óptico/eléctrico/óptico*) por resultar costosas en las redes de transmisión.
- Implementación de regeneradores *O/E/O* con costos comparables a los amplificadores ópticos.

En la Figura i.1 se muestra el desarrollo histórico de las tecnologías en comunicaciones en términos de BL y el surgimiento de cada tecnología como hito que apuntaló el desarrollo en cada época.



ii Conceptos generales

Redes de comunicaciones

Las redes de comunicación en el mundo son muy diversas y de múltiples aplicaciones. Hay dos tipos de redes según su propósito: redes *públicas* y redes *privadas*. Las redes privadas pertenecen a particulares y tienen propósitos específicos diversos. Las redes públicas son operadas por *proveedores* u *operadores de servicios* (también llamados *carriers*) y sus servicios se comercializan a la población general en determinadas regiones geográficas.

Las redes públicas en un principio sólo eran proveedores de telefonía, sin embargo hoy en día hay múltiples modelos de negocio donde coexisten empresas que brindan uno o varios servicios, incluso algunas que no ofrecen servicios de telefonía. Existen esquemas de negocio donde operadoras de servicio no necesariamente son dueñas de la infraestructura sino compran ancho de banda de otros carriers para operar.

Las redes privadas comúnmente emplean los servicios y la infraestructura de otros carriers para construir sus redes. Las redes privadas se clasifican en tres tipos según su extensión:

- **Red de área local LAN (Local area network):** aquellas que comprenden pocos kilómetros de extensión y que pueden estar en edificios o en zonas residenciales.
- **Red de área metropolitana MAN (Metropolitan area network):** aquellas que cubren distancias de decenas a cientos de kilómetros abarcando áreas metropolitanas.
- **Red de área extendida WAN (Wide area network):** aquellas que cubren largas distancias en el rango de cientos a miles de kilómetros.

Las redes públicas se clasifican en dos tipos:

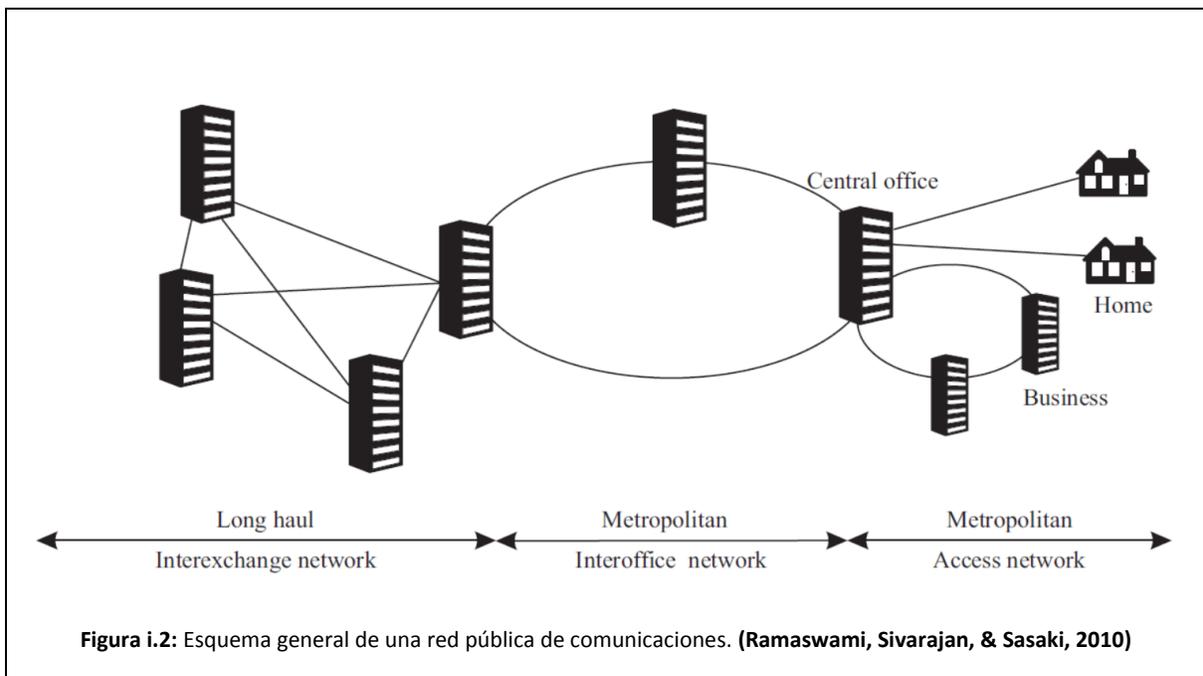
- **Red metropolitana (metro):** aquella parte de la red de comunicaciones que cubre una ciudad o una región. La red metro comprende dos partes:
 - **Red de acceso:** la que se extiende desde la oficina central de la operadora hasta los usuarios finales.
 - **Red de distribución:** la que interconecta las oficinas centrales de las operadoras, nodos o cajas de distribución y cubre extensiones de ciudades o regiones.
- **Red de larga distancia (troncal o principal):** aquella parte de la red de comunicaciones que interconecta ciudades o regiones para generar la estructura básica de la red de comunicaciones.

La red de acceso concentra mayormente el flujo de información de los usuarios hacia la red de la operadora y generalmente cubre distancias de pocos kilómetros. La red de distribución que

interconecta centrales, *distribuye* el tráfico de información que maneja la operadora y se extiende en distancias que llegan a decenas de kilómetros (la distancia que exista entre las centrales dentro de la ciudad).

La red de larga distancia se extiende a lo largo y ancho del mundo, atravesando aire, mar y tierra en distancias que van de cientos a miles de kilómetros. Esta parte de la red también se conoce como *backbone* ya que representa las principales conexiones troncales de internet en el mundo.

Tanto en la red principal como en la red de distribución se distribuye el tráfico de información, sin embargo generalmente la red principal es empleada por más de una operadora simultáneamente. Debido a esto, en ocasiones se requiere de otras redes de interconexión que permitan su operación. La Figura i.2 muestra el esquema general de una red pública de comunicaciones donde se observan las partes de la red que comprende la red metro y la red troncal.



No existen criterios absolutos en esta clasificación de la red de comunicaciones, mucho tiene que ver con las características específicas de cada lugar y de las empresas que dominan la industria. Como ejemplo podemos comparar las redes de comunicaciones en Norte América y en Europa. Las distancias entre ciudades en Europa son en general menor que las distancias entre ciudades de Norte América. Así también muchas zonas metropolitanas de Norte América son de mayor extensión que las europeas. Esto nos lleva a que redes metro en Norte América puedan tener redes de distribución más grandes y con mayor capacidad que algunas redes troncales en Europa.

De la misma manera las empresas que históricamente han dominado la industria son las que generan sus normas y eventualmente se establecen como criterios globalmente aceptados. Existe

el trabajo que desarrollan organismos internacionales como la *Unión Internacional de Telecomunicaciones ITU* y el *Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica IEEE* que desarrollan estándares que se publican como *recomendaciones* para el ejercicio de la construcción y operación de sistemas de telecomunicaciones.

Señales

Las telecomunicaciones basan su funcionamiento en la transmisión y procesamiento de señales. Estas señales son de naturaleza eléctrica o electromagnética, en forma de ondas radiales o bien en señales ópticas. La Figura i.3 muestra el *espectro electromagnético*, se pueden observar las diferentes señales en función de su frecuencia f [Hz] y de la longitud de onda λ [m], y la aplicación de las señales en cada caso.

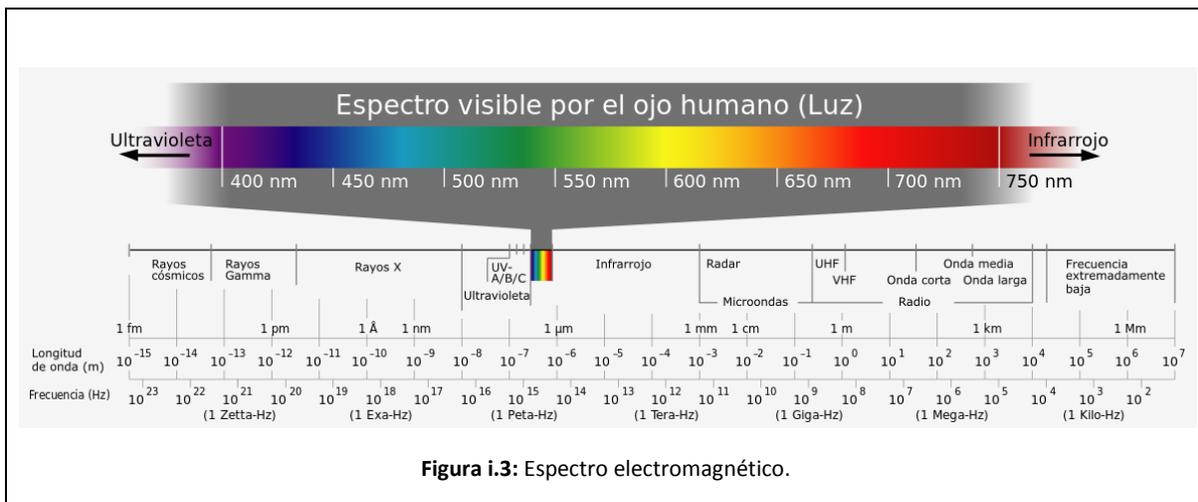


Figura i.3: Espectro electromagnético.

Las señales pueden ser *analógicas* o *digitales*, entendiéndose por las señales analógicas aquellas que varían su magnitud en función del tiempo de forma continua; las señales digitales son aquellas cuya magnitud no varía, por el contrario se normaliza con valores discretos de "1" y "0" denominados *bits* (*binary digit*). Las señales analógicas como su nombre lo infiere son *análogas* a la señal original, por ejemplo la señal de teléfono.

Las señales digitales manejan por lo general un código y dependen principalmente de la velocidad de transferencia de la señal. En la Figura i.4 se muestran una señal analógica (a) y una señal digital (b). El tiempo de duración de un bit T_B [s] se conoce como *periodo de bit* (o *bit slot*). La tasa de transferencia de bits, conocido como *tasa de bits* (o *bit rate*) $B = T_B^{-1}$ [bit/s] representa el número de bits por segundo. En las redes de comunicación la tasa de bits representa la capacidad del sistema para transmitir un número determinado de bits por segundo, lo que se traduce en velocidad de transferencia de datos.

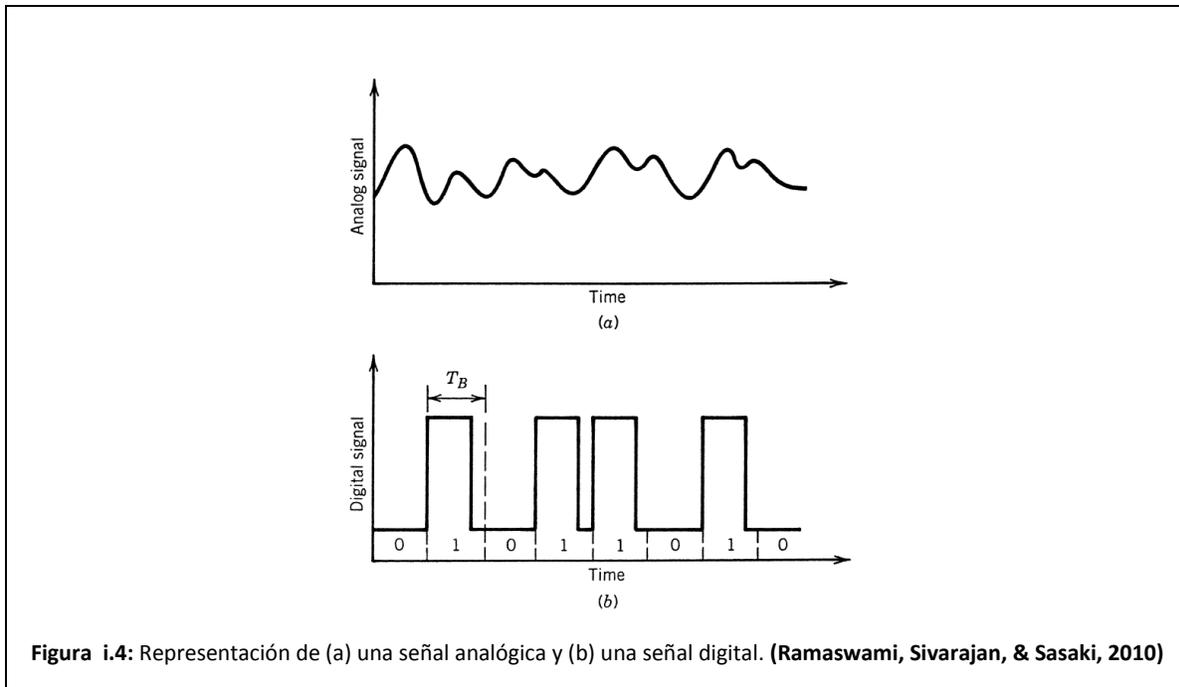


Figura i.4: Representación de (a) una señal analógica y (b) una señal digital. (Ramaswami, Sivarajan, & Sasaki, 2010)

Las señales digitales están basadas en el código ASCII, el cual representa por medio de una expresión binaria símbolos comunes (numerales, letras, signos de puntuación, etc.) y maneja un rango de 0 a 127 caracteres, lo que en números binarios corresponde a señales digitales de 7 bits. La forma extendida del código ASCII maneja un rango de 0 a 256 caracteres lo que corresponde a señales digitales de 8 bits conocidos como *bytes*. El byte se convirtió en una unidad estándar por lo que la tasa de bits generalmente se expresa en bytes por segundo [B/s].

Debido a la evolución de las comunicaciones son pocos los sistemas que actualmente transmiten señales analógicas como son TV abierta, radiodifusoras y telefonía fija. Estos sistemas siguen operando de esta manera debido a las características propias de la tecnología o bien por el costo de infraestructura y de operación, sin embargo generalmente es más eficiente transmitir señales digitales. Las señales analógicas se pueden convertir en señales digitales y transmitirse de esta manera. Se muestrean las señales a una determinada frecuencia de muestreo f_s que permite obtener valores digitales de byte para cada valor en amplitud, cuantizando la señal original en un rango dinámico de 256 valores de amplitud.

Algunos valores estándar de tasa de bits para diferentes servicios son los siguientes:

- Modem RTB: $128 [kbit/s] = 16 [kB/s]$
- ADSL: $64 [Mbit/s] = 8 [MB/s]$
- Cable: $30 [Mbit/s] = 3.75 [MB/s]$
- VSAT: $6 [Mbit/s] = 75 [kB/s]$
- Telefonía móvil 3G: $3 [Mbit/s] = 375 [kB/s]$

Capítulo 1. Obras de infraestructura en telecomunicaciones.

1.1. Contexto actual de las telecomunicaciones en México.

En las últimas décadas, el mundo ha observado un gran incremento en el desarrollo y la demanda de redes de comunicación. México no es la excepción, un 48.2% de los usuarios de la Internet accede a la red desde el hogar, según datos del INEGI en su *Estadísticas sobre disponibilidad y uso de tecnología de información en los hogares 2010*.

Las *Tecnologías de Información y Comunicaciones* (TIC) han permeado en casi todas las tareas cotidianas de una parte importante de la población mexicana en un periodo relativamente breve, ya sea en actividades laborales, en procesos de enseñanza-aprendizaje, como método preferente de comunicación e incluso como medio de entretenimiento. En México el 50.1% de la población hace uso de la telefonía celular, el 40.1% hace uso de la computadora y el 33.8% utiliza el Internet. En este contexto, los hogares en México con disponibilidad de telefonía fija crecieron de 2001 a 2010 en un 15.6%, los hogares con TV de paga crecieron 97.8% y los hogares con Internet crecieron en un 258%¹².

Por su parte el escenario de la industria de la construcción en México es revelador, la industria aporta el 6.2% al PIB total de la economía nacional según datos de 2012. Es la quinta actividad económica que mayor valor agregado genera a la producción nacional, impactando a 63 de las 79 ramas productivas del país. El pronóstico que emitió la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (CMIC) para 2013 fue positivo, refleja un crecimiento sostenido en la actividad económica del sector de la construcción promedio de 4% en el periodo 2013 a 2018. Aunado a esto, pronostica que de llevarse a cabo las reformas estructurales del Programa Nacional de Infraestructura, el crecimiento de la actividad de la industria alcanzaría rangos del 5% al 6%¹³.

Las telecomunicaciones se mantienen como uno de los sectores que respaldan el crecimiento del país. El Índice de Producción del Sector Telecomunicaciones (ITEL), que mide el comportamiento

¹² (INEGI, 2011)

¹³ (CMIC, 2013)

de las principales variables de producción del sector telecomunicaciones en el país, registró un aumento del 11% en el primer semestre de 2013 con respecto al mismo periodo del año anterior según reporta la Comisión Federal de Telecomunicaciones¹⁴. En este periodo el desempeño del ITEL fue superior al incremento del PIB nacional que fue de 1.5%.

Esta tendencia no es un fenómeno aislado, de 2005 al primer semestre de 2013 la variación porcentual anual promedio del ITEL es de 15.7% mientras que la del PIB es de 2.4%. Los segmentos que muestran un mayor dinamismo y crecimiento sostenido en México son la TV satelital, la TV por cable, internet, la telefonía celular móvil y la telefonía fija.

¹⁴ (COFETEL, 2013)

1.2. Ingeniería y construcción de obras en telecomunicaciones.

La ingeniería para la construcción de redes de comunicaciones emplea diversas tecnologías, dentro de las cuales las señales pueden ser eléctricas, ópticas o por microondas. Asimismo los medios de transmisión son diversos, ya que se trata de conductores eléctricos (generalmente cobre), fibras ópticas o el espacio (aire) en el caso de las señales de telefonía celular.

El número de aplicaciones y la complejidad de las redes de comunicación actuales se incrementan a medida que crece la demanda por parte de los usuarios, debido a esto la demanda en la cantidad de transferencia de datos se ha incrementado de forma drástica en estos últimos años. El ancho de banda requerido por un usuario promedio en el hogar, en la actualidad excede la limitada capacidad de las existentes redes de cobre. Este hecho propicia que las redes en el hogar experimenten actualmente una migración de la instalación existente en cobre por fibra óptica.

Las redes ópticas se basan en la transmisión de pulsos de luz emitidos por LEDs o láseres a través de fibras delgadas de sílice por largas distancias. El cable de fibra óptica en su forma más simple está compuesto por un *núcleo (core)* de sílice y un *revestimiento (cladding)* cuyo *índice de refracción (n)* es menor al del núcleo. El cambio en el índice de refracción y el ángulo de incidencia que ocurre en la interfaz entre el núcleo y el revestimiento permite que, cuando se hace pasar un haz de luz a través del núcleo, éste no se refracta al revestimiento sino que en su mayoría se siga propagando por el núcleo. En la Figura 1.5 se muestra la sección transversal de un cable óptico comercial.

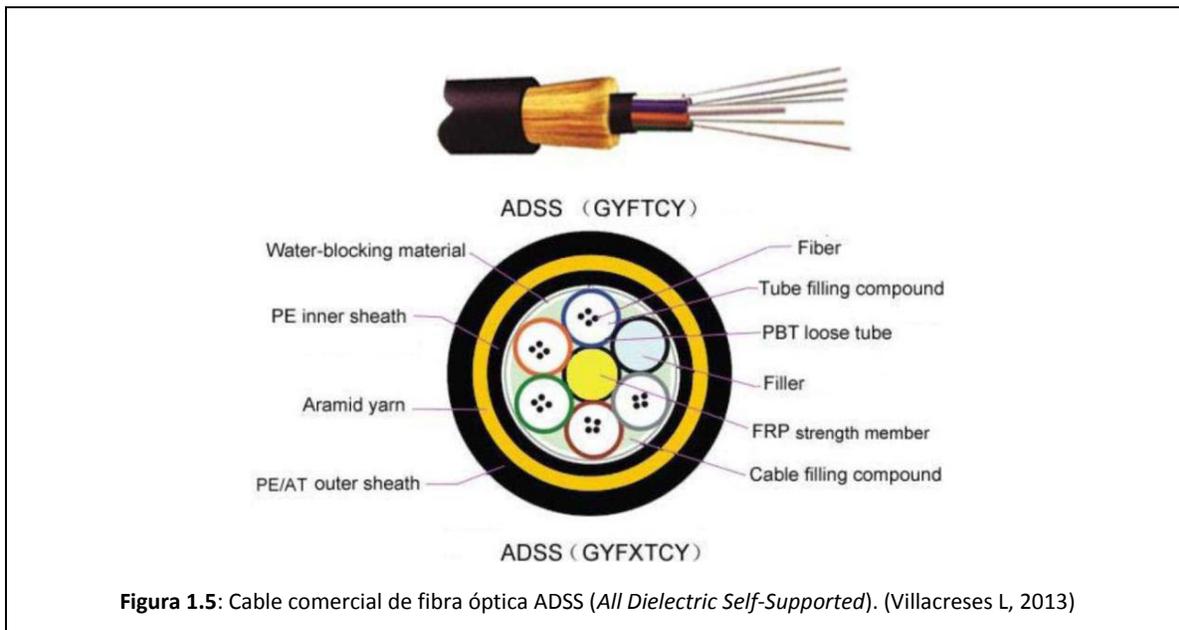
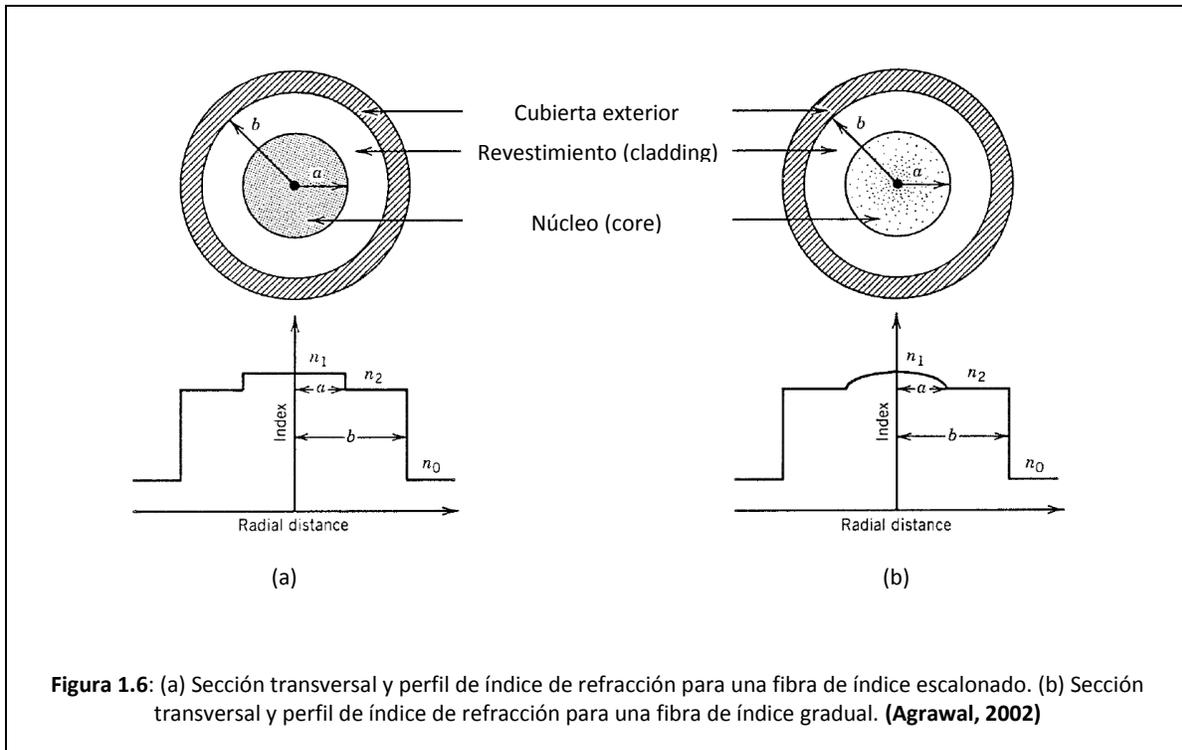


Figura 1.5: Cable comercial de fibra óptica ADSS (*All Dielectric Self-Supported*). (Villacreses L, 2013)

La Figura 1.6 muestra la sección transversal y el perfil de índice de refracción en dos tipos de fibra óptica: (a) fibra de *índice escalonado* y (b) fibra de *índice gradual*. En las fibras ópticas de índice escalonado, el cambio en el índice de refracción entre el núcleo y el revestimiento es abrupto. En cambio en las fibras de índice gradual este cambio no es abrupto, sino gradual como su nombre lo indica. En ambos diagramas a es la distancia radial del núcleo, b es la distancia radial del revestimiento, n_1 es el índice de refracción del núcleo y n_2 es el índice de refracción del revestimiento.



Cuando el haz de luz incide en la fibra óptica, siguiendo su trayectoria éste se propaga a través del núcleo hasta incidir nuevamente en la interfaz que se forma entre el núcleo y el revestimiento. En la Figura 1.7 se muestra cómo se propaga el haz de luz según los índices de refracción n_0 , n_1 y n_2 .

La luz incidente atraviesa el núcleo con un ángulo θ_r menor al ángulo de incidencia a la fibra θ_i respecto al eje de la fibra. El ángulo θ_r se obtiene de la Ley de Snell, y está dada por la expresión:

$$n_0 \sin \theta_i = n_1 \sin \theta_r$$

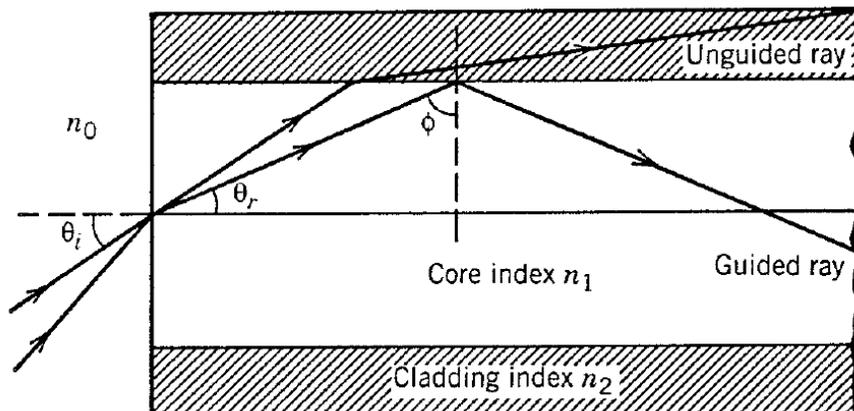


Figura 1.7: Confinamiento de la luz en reflexión total interna en una fibra de índice escalón. Los rayos para los que $\varphi < \varphi_c$ son refractados fuera del núcleo. (Agrawal, 2002)

Si se considera n_0 el índice de refracción del aire ~ 1.003 , debido que n_1 es generalmente mayor, el haz óptico atraviesa el núcleo con una ligera inclinación hacia el eje de la fibra. De la misma manera cuando el haz óptico incide en la interfaz entre el núcleo y el revestimiento, éste se refracta nuevamente según el valor del ángulo φ que se forma entre el eje transversal del cable y el haz óptico y por la relación n_2/n_1 .

La refracción del haz óptico en el revestimiento sólo es posible para valores de φ tales que:

$$\sin \varphi < n_2/n_1$$

Existe un rango del ángulo φ en el cual el factor n_2/n_1 permite que el haz óptico no atraviese al revestimiento sino que se refleje en la superficie de la pared interna del núcleo. Esto ocurre cuando el ángulo φ es mayor al *ángulo crítico* φ_c definido como:

$$\sin \varphi_c = n_2/n_1$$

Dentro de este rango el haz óptico se refleja en su totalidad en el núcleo a lo largo de la fibra óptica quedando confinado dentro del núcleo. A este fenómeno se le conoce como *reflexión total interna* y se presenta para todo ángulo $\varphi > \varphi_c$. Mientras más grande es el ángulo φ mayor será la distancia que recorre el haz óptico antes de reflejarse nuevamente, así, es posible que señales ópticas viajen prácticamente por el centro de la fibra por largas distancias de forma íntegra y con muy pocas pérdidas.

Según la trayectoria que describe el haz óptico a través del núcleo, las fibras se catalogan en dos tipos:

- Fibra óptica *monomodo SMF (single-mode fiber)*
- Fibra óptica *multimodo MMF (multi-mode fiber)*

Las fibras MMF permiten más de un modo de propagación, pueden ser de índice escalonado (*Step index*) o de índice gradual (*Graded index*). Las fibras MMF de índice escalonado presentan *dispersión modal*, debido a que las trayectorias a diferentes ángulos hacen que los rayos recorran las distancias de la fibra en diferentes tiempos resultando en el ensanchamiento de los pulsos, lo que limita la tasa de transferencia. Las fibras de índice gradual permiten que los tiempos en todos los modos de los rayos ópticos sean similares, lo que reduce la dispersión modal y permite mayores tasas de transferencia.

Las fibras SMF sólo permiten un modo de propagación, lo que se consigue haciendo más angosto el núcleo y disminuyendo la diferencia entre los índices de refracción del núcleo y del revestimiento. La Figura 1.8 muestra los modos de propagación en los diferentes tipos de fibra óptica.

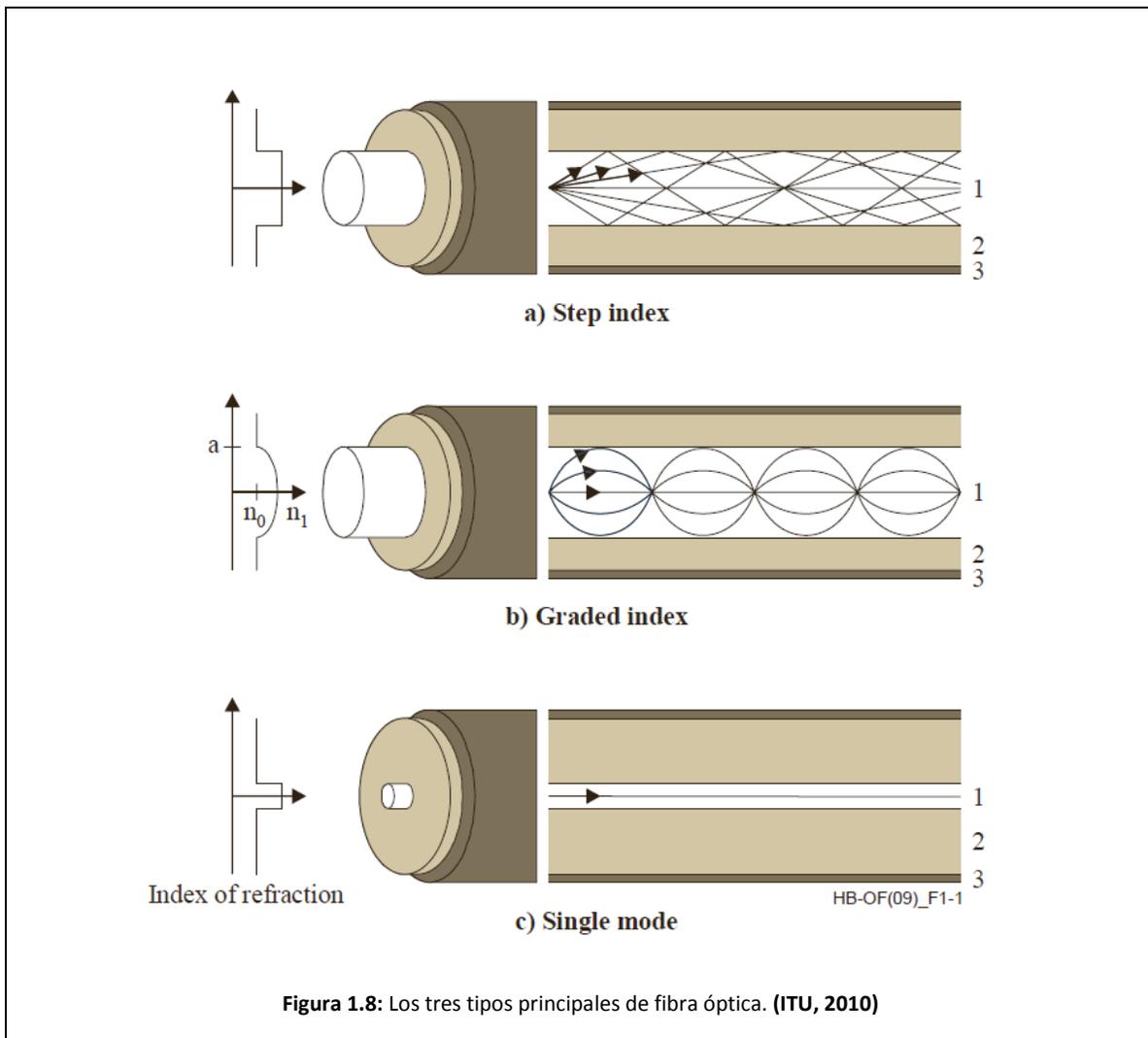


Figura 1.8: Los tres tipos principales de fibra óptica. (ITU, 2010)

Las fibras MMF son generalmente utilizadas en redes de corta distancia, se utilizan en una variedad de aplicaciones debido a que son más accesibles en costo. Las fibras SMF se utilizan en redes de distribución y redes troncales, ya que requieren un mayor ancho de banda y una menor atenuación. La norma ITU establece que el diámetro del revestimiento en todas las fibras ópticas debe ser de 125 [μm] y el diámetro del núcleo en fibras MMF debe ser de 50 o 62.5 [μm] y en fibras SMF de 8 a 10 [μm].

Existen parámetros característicos en las redes ópticas, estos pueden ser: *parámetros fundamentales de la fibra óptica* y *parámetros de la red o del enlace*. Los parámetros fundamentales de la fibra óptica se refieren a las características intrínsecas de la fibra óptica y se obtienen de caracterizar las fibras ópticas de acuerdo a la geometría, el diseño y el material de la fibra.

Los parámetros fundamentales son:

- Diámetro del núcleo: [μm]
- Apertura numérica: NA [*adim*]
- Coeficiente de dispersión cromática: D [$\text{ps}/\text{nm}\cdot\text{km}$]
- Coeficiente de atenuación: a [dB/km]

Los parámetros de la red o el enlace se refieren a los parámetros de diseño y desempeño de la red o el enlace y son los siguientes:

- Atenuación: a [dB]
- Dispersión: D [ps/nm]
- Tasa de transferencia: B [B/s]
- Ancho de banda: BW [Hz]

La atenuación y la dispersión son dos parámetros particularmente importantes en el diseño y desempeño de una red o un enlace ya que ambos limitan al sistema en el producto BL . La atenuación es importante para definir el espacio de repetición del enlace ya que a cierta distancia L [km] es necesario amplificar la señal debido a las pérdidas en el sistema. En el caso de la dispersión es importante ya que ésta limita al enlace en la tasa de bits B [B/s] debido al ensanchamiento de los pulsos de la señal. La tasa de bits y el ancho de banda generalmente son parámetros establecidos de diseño con valores estandarizados.

La atenuación en las fibras ópticas se refiere a la pérdida en la intensidad de la señal a través de la red o el enlace de fibra óptica y se debe a dos mecanismos de pérdidas principalmente: la absorción del material y el fenómeno conocido como *Esparcimiento de Rayleigh*.

El nivel de pérdida de señal en una fibra óptica se describe mediante la siguiente ecuación:

$$P_o = P_i e^{-\alpha L}$$

Dónde:

P_o : Potencia al final de la longitud de la fibra óptica.

P_i : Potencia de entrada en la fibra óptica.

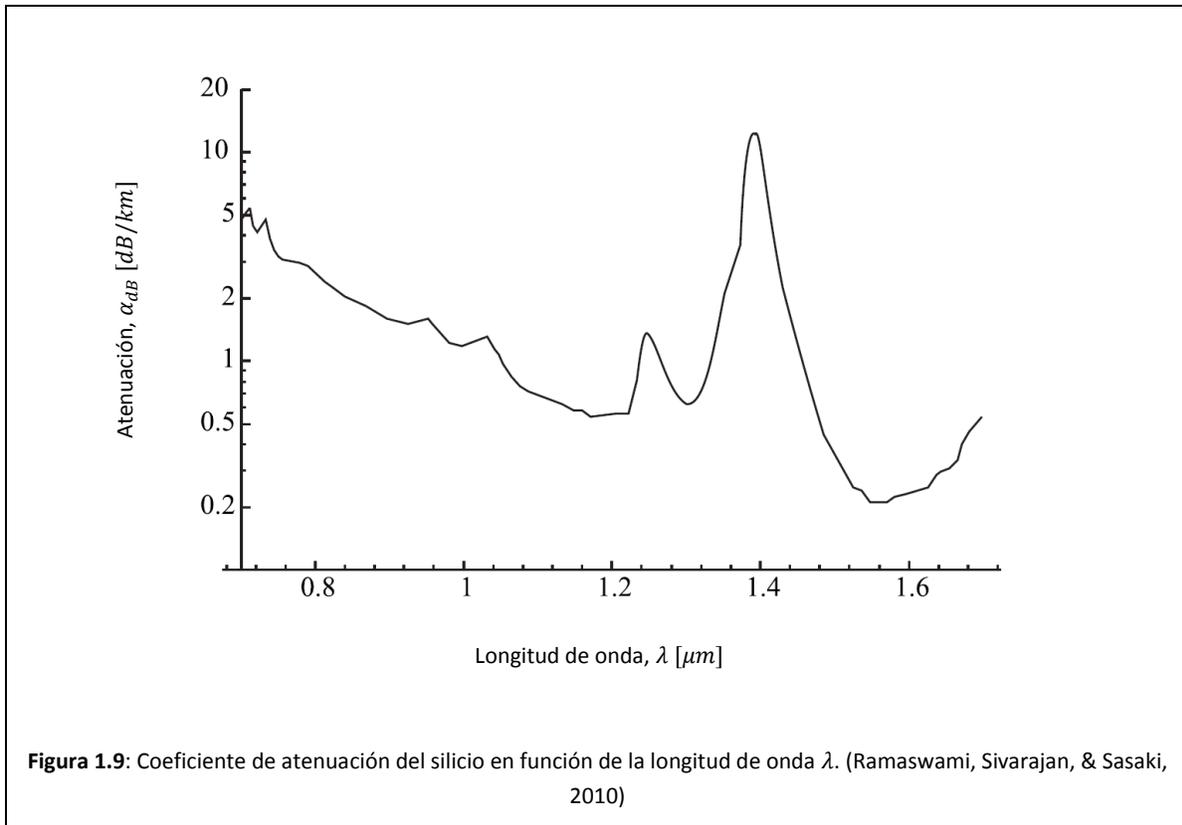
L : Longitud de la fibra óptica.

El parámetro α se refiere al coeficiente de atenuación de la fibra óptica, el cual es un parámetro fundamental. Normalmente este parámetro se expresa en $[dB/km]$, de manera que, se puede obtener el coeficiente α_{dB} si la longitud de la fibra es $L = 1[km]$:

$$10 \log_{10} \frac{P_o}{P_i} = -\alpha_{dB}$$

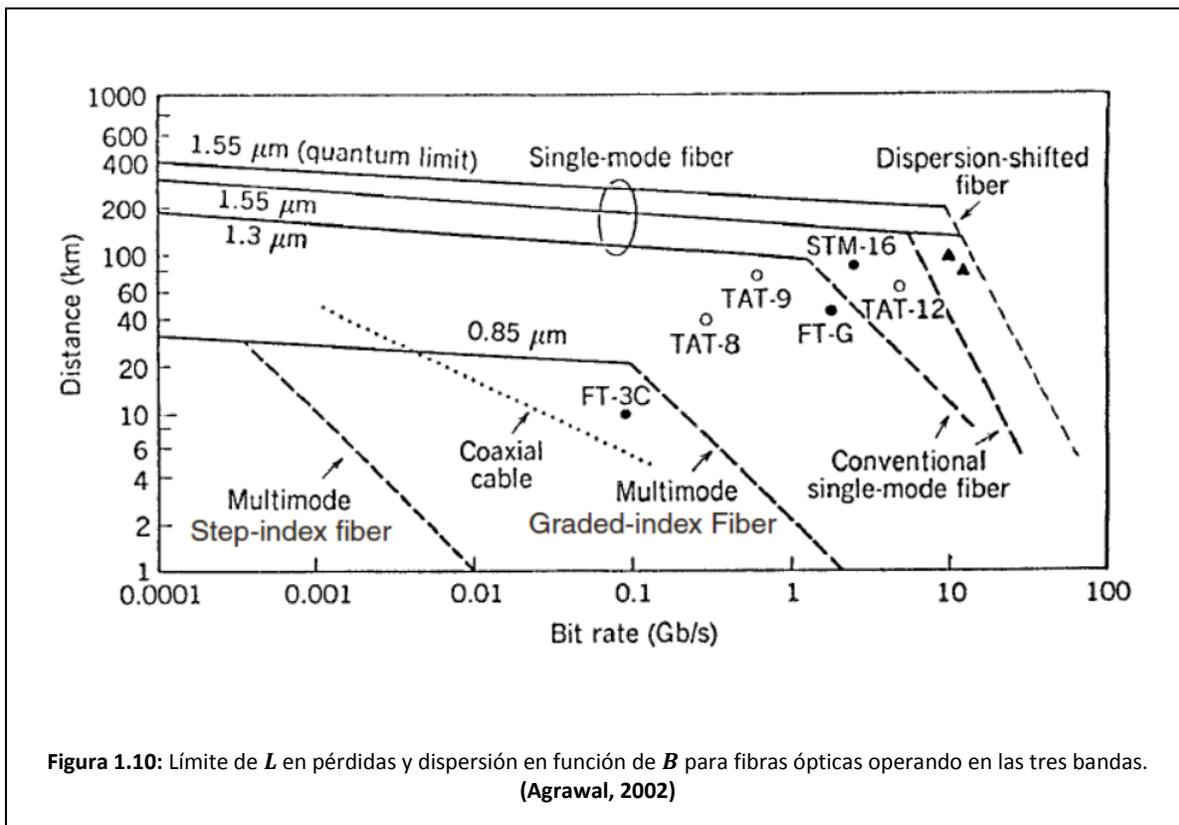
$$\alpha_{dB} = (10 \log_{10} e) \alpha$$

$$\alpha_{dB} \approx 4.343 \alpha [dB/km]$$



La Figura 1.9 muestra la curva del coeficiente de atenuación en fibras de SiO_2 en función de la longitud de onda. En las bandas de 850 [nm], 1300 [nm] y 1550 [nm] que se utilizan en las comunicaciones ópticas, se presentan niveles típicos de pérdidas α_{dB} de 2.5 [dB/km], 0.4 [dB/km] y 0.25 [dB/km] respectivamente. Estos valores típicos son relativamente bajos si se considera que para los sistemas de comunicaciones ópticos el nivel de atenuación que requiere de amplificar la señal es en el rango de 20 a 30 [dB]¹⁵.

En la Figura 1.10 se aprecian las pérdidas en fibras ópticas operando en las tres bandas, las líneas sólidas representan las pérdidas y las líneas de guiones la dispersión.



La dispersión es una propiedad de las fibras ópticas que se define como la variación en la velocidad de grupo (las componentes de la señal óptica) lo que produce el ensanchamiento de los pulsos de la señal. Como consecuencia del ensanchamiento de los pulsos, la dispersión limita la tasa de transferencia de la red o el enlace.

¹⁵ (Ramaswami, Sivarajan, & Sasaki, 2010)

Los tres tipos principales de dispersión son:

- **Modal:** Se presenta en MMF de índice escalonado debido a los múltiples modos de propagación que permite la fibra óptica.
- **Cromática:** Se presenta en todas las fibras ópticas, sin embargo es más significativa en SMF. Se presenta por dos factores: debido al material y a la guía de onda.
- **Polarización:** Se presenta en SMF debido a la birrefringencia propia de la fibra óptica donde las componentes del índice de refracción n_x y n_y cambian con respecto de la polaridad.

Cuando la distancia limitante en dispersión es menor a la distancia limitante en pérdidas se dice que el sistema está limitado por dispersión. Si se observa nuevamente la Figura 1.10 se puede apreciar que para tasas de transferencia B mayores a 1 [Gb/s] los sistemas se limitan por dispersión, mientras que a valores menores de B los sistemas se limitan por pérdidas

El ancho de banda BW [Hz] al igual que en otros medios de transmisión de señales, se puede medir como un rango de frecuencias Δf [Hz] o bien en términos de la longitud de onda $\Delta \lambda$ [nm] (ancho espectral).

La relación del ancho de banda en términos de la frecuencia y la longitud de la onda se obtiene de diferenciar la expresión $f = c/\lambda$ con respecto de λ :

$$\Delta f \approx \frac{c}{\lambda^2} \Delta \lambda$$

Dónde:

c : Velocidad de la luz.

λ : La longitud de onda de la señal portadora.

f : Frecuencia fundamental de la señal portadora.

La apertura numérica es un parámetro adimensional que caracteriza el rango de ángulos para los cuales una fibra óptica puede transmitir señales ópticas y es particularmente importante en fibras MMF. Teóricamente la apertura numérica máxima de una fibra se obtiene a partir del valor mínimo cuadrado de los índices de refracción del núcleo n_1 y del revestimiento n_2 . Valores reales de NA normalmente son 5% menores que el valor teórico NA_{tmax} .

$$NA_{tmax} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

1.2.1 Redes de telefonía.

La tecnología de los sistemas de comunicaciones se encuentra en constante evolución. De la misma manera también la telefonía ha tenido muchos cambios en el tiempo, pasaron de analógicos a digitales y finalmente la tecnología de voz por IP (Protocolo de Internet), de manera que el servicio telefónico se ha convertido en un término más amplio que puede abarcar varios significados. Una gran parte de los usuarios de redes de telefonía emplean las redes celulares que están basadas en transmisión de señales de microondas.

En el caso de la telefonía fija y la telefonía móvil, si bien ambos sistemas realizan comunicaciones de voz entre dos puntos distantes, los términos están relacionados con el tipo de acceso y la capacidad de movilidad del dispositivo telefónico.

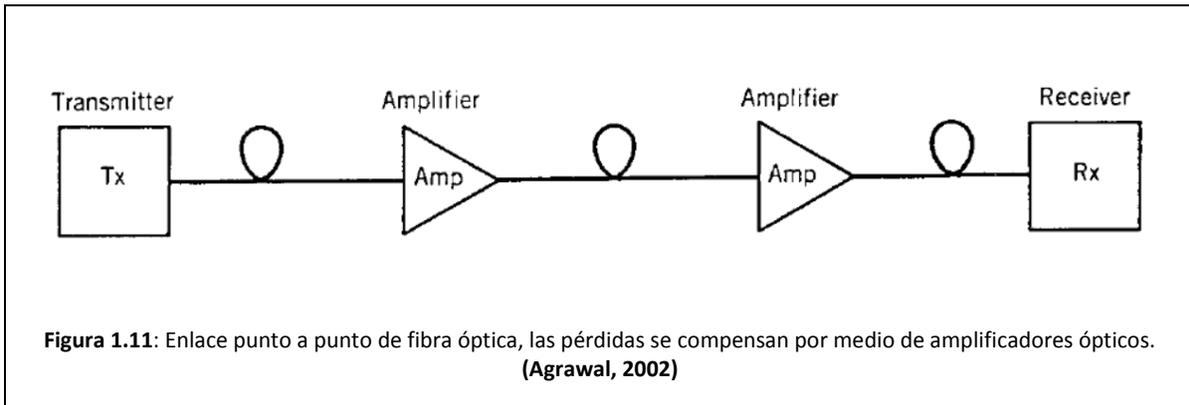
En un principio la red principal de telefonía empleaba una tecnología a base de pares de cable conductor conocido como par telefónico, actualmente se han ido reemplazando con redes de cable de fibra óptica. Esto no sólo permite que la infraestructura óptica opere la telefonía fija, sino que también soporte la comunicación telefónica móvil e IP. Las comunicaciones con fibra óptica permiten ser superiores a otros medios de comunicación en particular debido a su bajo nivel de pérdidas en la transmisión y por su gran espectro de frecuencias que llega hasta los 25 [THz], lo que es algunos ordenes de magnitud mayor al cobre o cualquier otro medio comercial.

Las redes de telefonía basadas en fibra óptica tienen una de las estructuras más simples en las redes ópticas. Estas redes esencialmente están formadas de enlaces punto a punto que sustituyen las líneas de cobre que anteriormente conformaban la llamada *planta externa* que en telefonía corresponde a la red principal de par telefónico para abonados del servicio. La arquitectura de estas redes está conformada por tres elementos principales:

- **Transmisor óptico:** Elemento que convierte una señal eléctrica en una señal óptica para así transmitirla por la fibra. Éste consta a su vez de: una fuente óptica, un modulador y un acoplador de canal.
- **Fibra óptica:** Es el canal de transmisión. Se trata del medio a través del cual se propaga la onda lumínica. La fibra óptica se une tanto al transmisor como al receptor a través de un acoplador.
- **Receptor óptico:** Elemento encargado de recibir y transformar la señal óptica proveniente de la fibra óptica en una señal eléctrica. Los componentes del mismo son: un acoplador, un foto-detector y un demodulador.

La principal característica de estas redes es su inmunidad para la interferencia electromagnética. Si los enlaces son de cierta distancia mayor a un rango de 20 a 100 [km], dependiendo de la longitud de onda de operación, es necesario compensar las pérdidas por medio de amplificadores

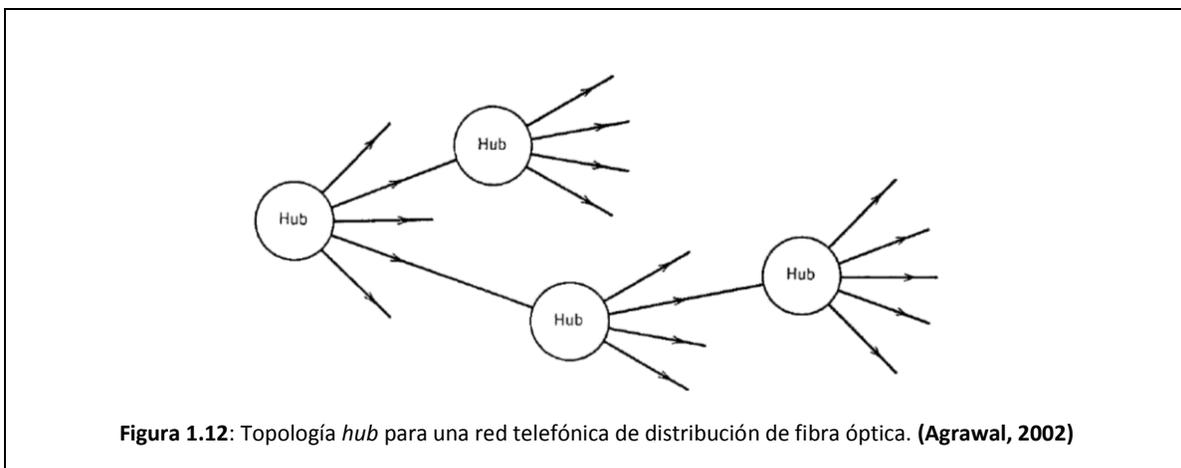
ópticos. Estos dispositivos amplifican la señal óptica sin necesidad de transformarla al dominio eléctrico. La Figura 1.11 muestra el esquema de un enlace punto a punto de fibra óptica.



En este tipo de enlaces el espacio de amplificación L es un parámetro importante de consideración en el diseño, debido en parte al costo que es más elevado en la medida en que L es menor. El producto BL , así como las pérdidas en la fibra óptica y la dispersión dependen de la longitud de onda de operación.

La red de telefonía por fibra óptica contempla una red de distribución. La topología en redes de telefonía generalmente es de tipo *hub*, la Figura 1.12 muestra un esquema de dicha topología. En este tipo de topología la distribución de los canales de audio telefónico se lleva a cabo en las centrales o *hubs* donde sistemas automáticos de interconexión operan las señales telefónicas en el dominio eléctrico.

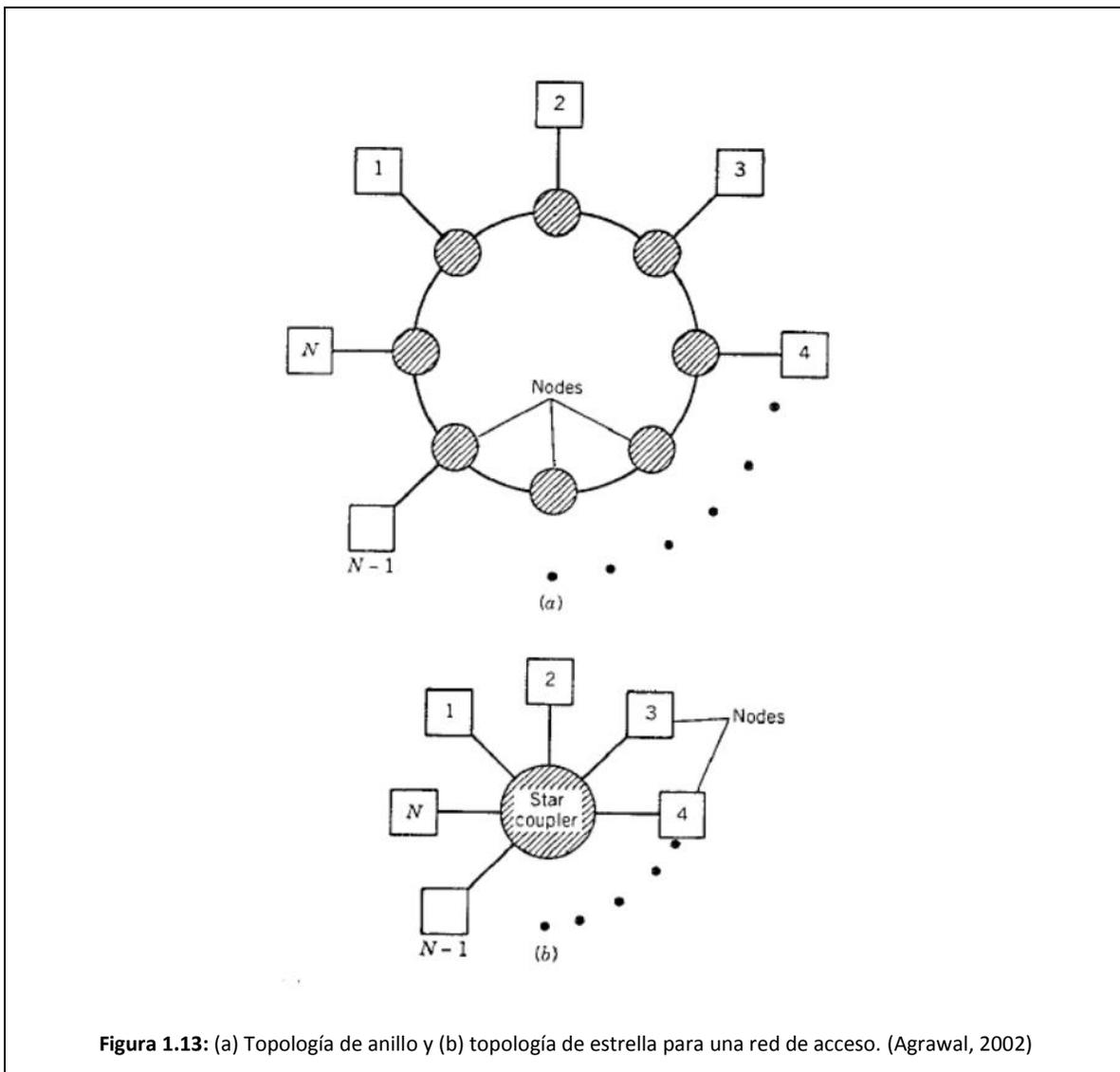
En ciertas redes de distribución se contemplan no sólo servicios de telefonía, ya que se trata de una *red digital de servicios integrados RDSI (integrated-services digital network, ISDN)*. Las RDSI contemplan la distribución de servicios como teléfono, televisión digital o internet. Las RDSI manejan distancias $L < 50 [km]$ pero pueden manejar tasas de transferencia de $B = 10 [Gb/s]$ en sistemas de banda ancha.



1.1.2. Redes de acceso.

Las redes de acceso ópticas (así como las redes LAN) se caracterizan por conectar un gran número de usuarios que se interconectan y que su acceso es aleatorio, así como lo es la transmisión de información entre ellos. Debido a que las distancias son relativamente cortas ($< 10 [km]$) las pérdidas no representan un mayor problema, como sí lo es el ancho de banda y la tasa de transferencia.

Existen tres topologías principales en este tipo de redes: *bus*, *anillo* y *estrella*. Las topologías más comunes son la topología de anillo y la topología de estrella, ambas se pueden observar en la Figura 1.13.



En la topología de anillo se interconectan nodos por medio de enlaces punto a punto para formar el anillo. En cada nodo se transmite y se recibe información por medio de un par transmisor-receptor, que a su vez funciona de repetidor. En el caso de redes LAN de fibra óptica comercialmente se emplea una interfaz estandarizada conocida como FDDI (*Fiber Distributed Data Interface*), la cual opera a 100 [Mb/s] con fibras MMF y transmisores que operan en la banda de 1300 [nm].

En la topología de estrella se interconectan los nodos por medio de enlaces punto a punto a una central o hub. Esta topología es más utilizada que la topología de anillo ya que permite dos tipos de distribución, *activa* y *pasiva*, dependiendo si el hub es un dispositivo activo o pasivo. Las redes de acceso ópticas activas convierten todas las señales al dominio eléctrico por medio de receptores ópticos. La señal eléctrica es entonces distribuida en transmisores individuales por nodo.

Las redes pasivas de fibra óptica se conocen como *PON (Passive Optical Network)*. Éstas llevan a cabo la distribución en el dominio óptico por medio de acopladores direccionales. Debido a que la señal de entrada de un nodo es distribuida en muchos nodos, la potencia transmitida a cada nodo depende del número de usuarios. De esta manera el número de usuarios que soporta la red pasiva está limitado por las pérdidas de distribución. Idealmente (en un escenario sin pérdidas) la potencia se divide en el número de usuarios $P_N = P_T/N$. Sin embargo en un caso real con pérdidas por distribución, la potencia en el nodo P_N se calcula con la siguiente expresión:

$$P_N = (P_T/N) (1 - \delta)^{\log_2 N}$$

Dónde:

δ : Pérdidas de inserción del acoplador direccional

La topología de estrella en una red pasiva puede soportar hasta 500 usuarios si se considera $\delta = 0.05$, $P_T = 1$ [mW] y $P_N = 0.1$ [μ W] como valores nominales.

1.1.3. Redes Híbridas Coaxial-Fibra Óptica (HFC).

Dentro de las arquitecturas de red para los sistemas de transmisión para televisión por cable, la más utilizada hoy en día es una red híbrida en la cual interviene la combinación de fibra óptica y la utilización de cable coaxial. Con el avance de la tecnología y la implementación de nuevos sistemas de transmisión, las arquitecturas de televisión por cable evolucionan de forma natural para crear una red interactiva que permite la utilización del ancho de banda en una forma bidireccional, añadiendo a esta red la posibilidad de implementar los servicios de: voz y datos, canales digitales para servicios de entretenimiento y los canales convencionales de televisión.

Con esta arquitectura se logra contar con una red de alta eficiencia, para transmisión de vídeo, voz y datos, introduciendo la posibilidad de servicios de mercadeo, reduciendo considerablemente los gastos de mantenimiento utilizando la facilidad de detectar fallas por vía remota, así como también las instalaciones, ya que estos servicios pueden ser asignados o modificados electrónicamente.

Una red HFC se compone de una cabecera que envía y recibe información a través de una red de fibra óptica que llega a los hubs, del cual salen derivaciones también de fibra óptica a cada uno de los nodos que dependen de él. Se entiende por nodo a una concentración de un número determinado de casas, que pueden ser de 200 (± 20) casas para niveles socioeconómicos denominados A (nivel socioeconómico más alto); y de 700 (± 50) casas para niveles A y B, unidos a través de una red de cable coaxial a un receptor óptico.

En la red de HFC existen elementos *activos* y elementos *pasivos*. Los elementos activos son aquellos que elevan los niveles de señal y requieren de alimentación de AC para su funcionamiento. Los elementos pasivos son aquellos que no requieren de alimentación.

En un nodo tenemos una red de acceso y una red de distribución. En este caso la red de distribución la conforman cables coaxiales calibre 0.500 auto soportado, la cual es enlazada a la red de acceso por medio de un sólo amplificador. A partir de éste empieza la red de acceso formada también por cable coaxial 0.500 auto soportado, acopladores direccionales, divisores, así como también de TAPs que es el elemento final de conexión al usuario.

El ancho de banda que utilizan estas redes es típicamente de 1 [GHz], lo que permite una mejor calidad de los servicios integrados.

1.1.4. Radio bases de telefonía móvil.

La telefonía móvil, una de las mayores aplicaciones de telecomunicaciones en México y a nivel global, funciona a base de propagación de microondas en el espacio. Las radio bases, también conocidas como *BTS (Base Transceiver Station)* son sitios en los que existe un equipo de radio cuya función es la recepción y transmisión de dichas ondas para así intercomunicar teléfonos celulares por medio de antenas. En México más del 50% de la población hace uso de la telefonía celular, lo que la convierte en un motor de desarrollo, involucrando a todas las industrias relacionadas.

Los elementos básicos de una radio base son las antenas, la torre y el contenedor. En la torre se encuentran montadas las antenas y dentro del contenedor se colocan los equipos de radio transmisión. El sistema en general requiere de una instalación eléctrica, una acometida de fibra óptica y un sistema a tierra.

Ambos, las antenas y los equipos de radio transmisión, dependen de la tecnología que emplea la red. Actualmente se encuentran en operación sitios con tecnologías TDMA, 2G-GSM, 3G-UMTS y 4G-LTE. Las bandas de operación para la tecnología de segunda generación GSM (*Global System for Mobile Communications*) son 850, 900, 1800 y 1900 [MHz]. Los sistemas de tercera generación UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) operan en el espectro de 800 a 2100 [MHz]. En el caso de México, la red UMTS opera en la banda de 850 [MHz].

El diseño de una radio base considera 4 aspectos:

- Tipo de torre.
- Equipo de transmisión.
- Nicho de la acometida.
- Plataforma de operación (plataforma donde se colocan las antenas).

La instalación eléctrica tiene como objetivo proporcionar energía para los equipos y para los sistemas de iluminación que se instalan dentro de la radio base. En su diseño se considera una acometida eléctrica, la alimentación para equipos, iluminación de la torre y alumbrado exterior. También se considera el consumo total de energía, la trayectoria de la canalización que alimenta los equipos de radio transmisión y las protecciones para variaciones de corriente.

La acometida de fibra óptica es un enlace punto a punto que interconecta la BTS con la red de la operadora.

Capítulo 2. Administración de proyectos basado en la Teoría de Restricciones.

2.1 Política de administración de proyectos según el PMI.

El *Project Management Institute (PMI)* es la asociación internacional más grande y de mayor injerencia a nivel mundial en la profesión de la administración de proyectos. Uno de los principales propósitos del PMI es generar estándares en procesos y políticas de administración de proyectos, de la mano con programas de certificación para profesionales en la materia. El PMI se alimenta del trabajo y la experiencia de miles de voluntarios y personas interesadas en estos tópicos quienes desarrollan el cuerpo de conocimiento mediante un proceso de generación de información (proveniente de la experiencia en la profesión), consensos, evaluación y verificación de la precisión e integridad de la información. El cuerpo del conocimiento (conjunto normas, métodos, procesos y prácticas establecidos) del PMI se sintetiza en un documento llamado *Guía de los Fundamentos para la Dirección de Proyectos (Guía del PMBOK)* y en su *Extensión de Construcción*¹⁶. Este documento representa la norma con las buenas prácticas en la administración de proyectos mayormente utilizada a nivel mundial. En la actualidad global, y en particular en la realidad de México, la gran mayoría de las empresas constructoras basan sus procesos y políticas de administración de proyectos en los estándares del PMI. De la mano con los preceptos del PMI existe el estándar ISO (*International Organization for Standardization*) para proyectos de construcción, a los cuales corresponden la serie ISO 9000.

El PMI define a un proyecto como un “esfuerzo temporal que se lleva a cabo para crear un producto, servicio o resultado único”¹⁷. Esto implica que un proyecto es finito, que tiene un principio y un final definidos. Por lo anterior es posible establecer que el proyecto se terminará con el cumplimiento o no de los objetivos del mismo. Así también es posible que un proyecto termine si es el caso que ya no existe la necesidad que le dio origen. Los proyectos de construcción son proyectos con alto grado de riesgo en sus proyecciones de costo y tiempo debido a que cada uno es único, a pesar de que pueden ser prototípicos (como una casa, un edificio o una radio base). Al ser construidos en diferentes sitios, cada proyecto presenta sus propios desafíos en el control del tiempo y los costos. De manera que los aspectos ambientales, particularmente geográficos, representan un alto impacto en él, resultando que suele ser un producto único, difícilmente reproducido de forma masiva. Generalmente los proyectos de construcción agrupan especialistas de diferentes disciplinas y también involucran diversos accionistas que pueden llegar a tener expectativas diferentes unos de otros. Los proyectos de construcción también se

¹⁶ (PMI, 2007)

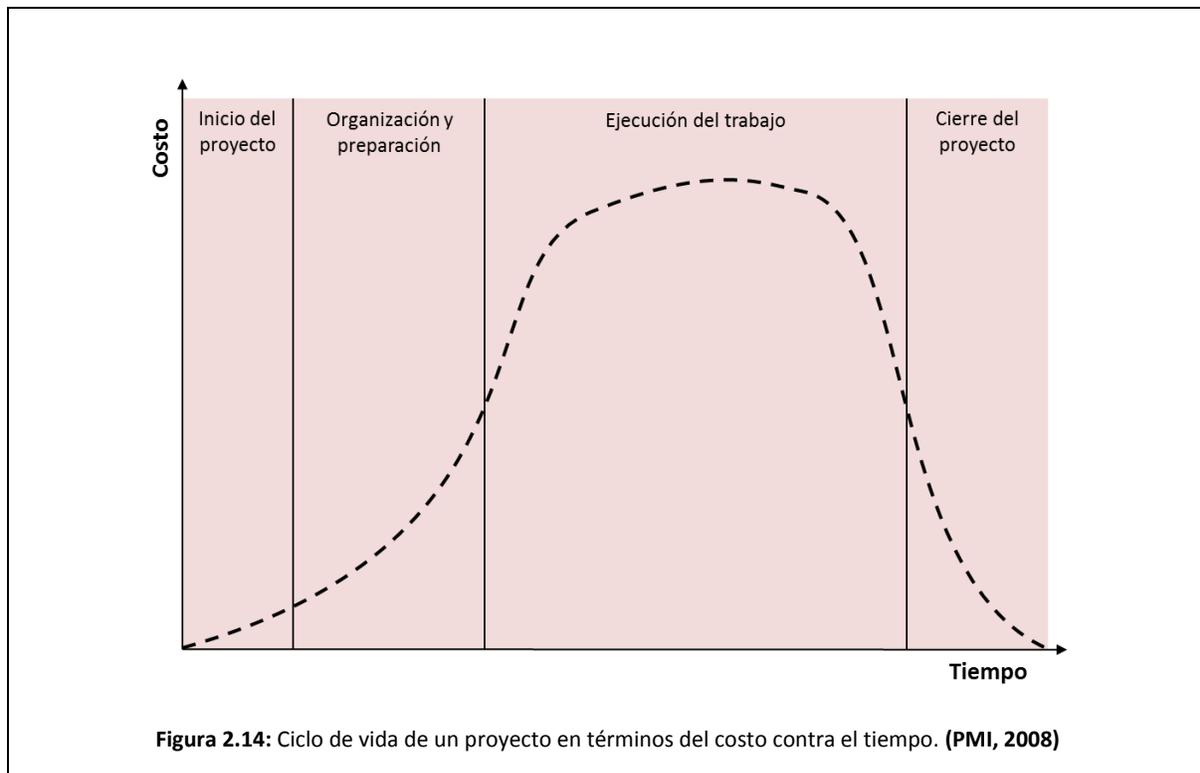
¹⁷ (PMI, 2008)

caracterizan por involucrar maquinaria pesada y mucho movimiento de diversos materiales. Generalmente trabajan en el mismo proyecto varias empresas que van desde proveedores de servicios de mano de obra, materiales, herramientas, servicios de alimentación, hospedajes, etc.

La dirección de proyectos es “la aplicación de conocimientos, habilidades, herramientas y técnicas a las actividades del proyecto para cumplir con los requisitos del mismo”¹⁸. Esto implica por lo general identificar los requisitos, considerar las necesidades, inquietudes y expectativas de los interesados; y mediar con las restricciones en cuanto al alcance, la calidad, el cronograma, el presupuesto, los recursos y el riesgo.

Los proyectos de construcción tienen un ciclo de vida definido en 4 fases principales, la Figura 2.14 muestra las fases del proyecto y la curva de costo contra tiempo. Las fases son las siguientes:

- Inicio
- Organización y preparación
- Ejecución del trabajo
- Cierre



Si bien la documentación que ofrece el PMI es muy extensa con 42 procesos agrupados en 5 grupos principales, existen elementos básicos que son considerados en general para gestionar un

¹⁸ (PMI, 2008)

proyecto de construcción. En buena medida el éxito en la culminación del proyecto depende de que en un inicio se tenga claridad en el alcance del proyecto.

La administración tradicional de proyectos tiene un enfoque cartesiano, en el sentido de emplear el análisis y la síntesis para controlar todos los aspectos del proyecto. Si se expresa el proyecto como un proceso a nivel 0, es decir el más alto nivel de abstracción, se observan las actividades que son generales. La Figura 2.15 muestra el proceso a nivel 0 del proyecto de construcción. Cada una de ellas conlleva un grupo de actividades que deben completarse para que la actividad general se complete. En consecuencia, al completarse las actividades generales del proyecto en tiempo, costo y alcance se podrá completar el proyecto satisfactoriamente en los mismos parámetros.

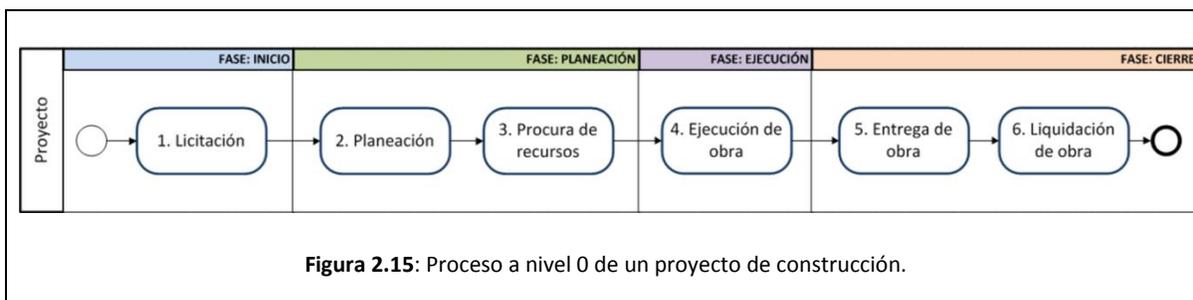


Figura 2.15: Proceso a nivel 0 de un proyecto de construcción.

La fase de inicio del proyecto corresponde a la licitación del proyecto. En esta fase se genera un estudio preliminar y un presupuesto a costo directo y a valor de venta. Podemos identificar la entrada de este proceso como las bases de licitación de proyecto y el entregable o salida del proceso al contrato o la orden de trabajo.

La fase de organización y preparación, o fase de planeación, es fundamental en los proyectos de construcción. Se genera una *Carpeta de proyecto* para administrar la documentación del mismo. Por lo general los documentos que conforman ésta carpeta son: *Ingeniería de proyecto*, *Memoria descriptiva del proyecto*, *Presupuesto de obra*, *Plan de ejecución*, *Programa de suministros*, *Organigrama del proyecto*, *Flujo de ingresos-egresos* y *Análisis de riesgos*.

La técnica para el análisis de actividades y su descomposición en sub actividades se conoce como *Estructura de Desglose de Trabajo*, *EDT*, o *WBS (Work Breakdown Structure)*. La EDT es una descomposición jerárquica, basada en los entregables del trabajo que debe ejecutar el equipo del proyecto para lograr los objetivos del mismo y crear los entregables requeridos. Cada nivel descendente de la EDT representa una definición cada vez más detallada del trabajo y alcance del proyecto¹⁹.

El trabajo se descompone en *paquetes de trabajo* que pueden ser programados, monitoreados, controlados y sus costos pueden ser estimados. Los paquetes de trabajo representan los entregables del proyecto y se controlan mediante un plan de trabajo. El cumplimiento del

¹⁹ (PMI, 2008)

entregable y el costo generado será producto del esfuerzo realizado, no en el esfuerzo en sí mismo, y será evaluado en cuanto a su desempeño en los 3 requerimientos principales de costo, tiempo y alcance.

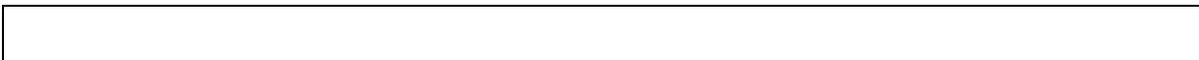
Es posible tomar las actividades generales del proyecto de construcción (Figura 2.15) y formar una EDT con actividades a un nivel mayor, que sea conveniente para el control de proyecto. En general siempre es bueno procurar pocos niveles de descomposición, siempre que el detalle de las actividades nos permita programarlas, estimarlas y controlarlas. La Figura 2.16 muestra la EDT del proyecto en un nivel 1 (primer nivel). Las actividades del proyecto son las unidades de control del proyecto, sus variables son la *duración*, el *esfuerzo* y el *alcance*. Las tres variables son funciones del tiempo y se miden en dinero.

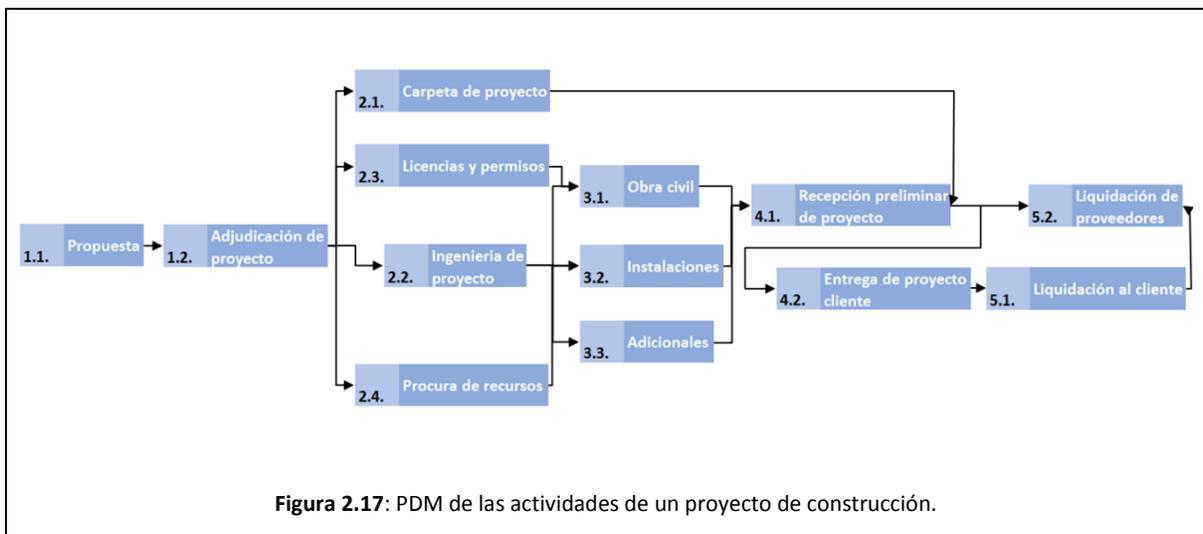
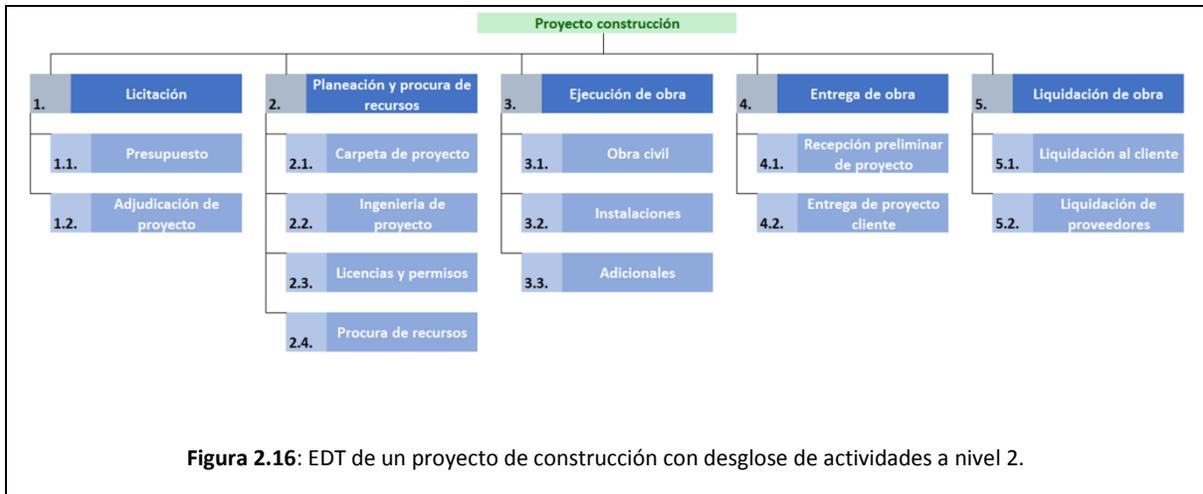
Una EDT general para un proyecto de construcción a nivel 1 contiene cinco actividades principales y trece actividades de primer nivel. La correcta definición de actividades va a depender de cómo se requieran controlar las variables: duración, esfuerzo y alcance.

El paso siguiente a la definición de las actividades es secuenciarlas. La secuencia de las actividades se establece mediante relaciones lógicas. Cada actividad o hito, a excepción del primero y el último, se conecta con al menos un predecesor y un sucesor. El entregable de cada actividad o hito se convierte en la salida de esa actividad y en la entrada de la actividad que le sucede. Existe un método en la gestión de proyectos conocido como *Diagramación por procedencia (PDM)*, el cual explica que para establecer un cronograma de actividades es necesario generar un diagrama de red mostrando las actividades como rectángulos llamados *nodos* que se conectan con flechas que representan sus relaciones lógicas. La Figura 2.17 muestra el diagrama de dependencias de las actividades establecidas en la EDT.

El PDM contempla cuatro tipos de dependencias o relaciones lógicas:

- **Final a inicio (FI):** El inicio de la actividad sucesora depende de la finalización de la actividad predecesora.
- **Final a final (FF):** La finalización de la actividad sucesora depende de la finalización de la actividad predecesora.
- **Inicio a inicio (II):** El inicio de la actividad sucesora depende del inicio de la actividad predecesora.
- **Inicio a final (IF):** La finalización de la actividad sucesora depende del inicio de la actividad predecesora.





A partir de tener definidas las actividades y sus dependencias es posible emplear métodos específicos para la estimación de cada una de las variables que nos permitan completar un *Plan de ejecución*.

El esfuerzo que se requiere para el cumplimiento de las actividades está dado por los recursos humanos, materiales o suministros requeridos para ejecutar la actividad. La estimación de recursos para la actividad está estrechamente relacionada con la estimación del costo. La estimación de recursos que se requiere para una determinada actividad del proyecto se realiza tomando en cuenta dos aspectos, principalmente: *Análisis de las alternativas* y *Datos de estimación publicados*.

A lo que se refiere el *Análisis de las alternativas* es tomar en cuenta los rendimientos en tiempo y costo de los diferentes tipos o alternativas de recurso que pueden emplearse para completar la actividad. Es decir, el análisis comparativo del uso de dos o más alternativas de recurso que puede

emplearse para la misma actividad y que emplean diferentes tiempos y costos. Se debe contemplar el uso del recurso más eficiente.

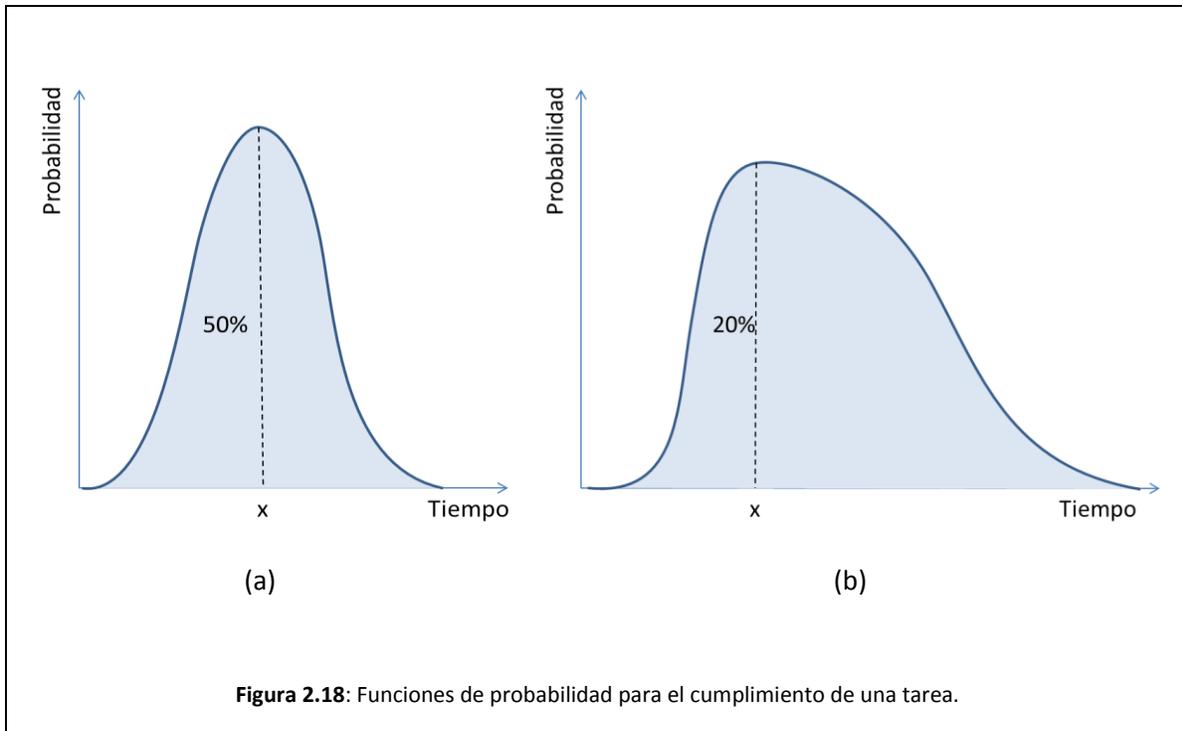
Los *Datos de estimación publicados* son el conjunto de costos unitarios, índices de producción y catálogos de los recursos que generan muchas empresas y se publican periódicamente para diferentes industrias, materiales y equipos; así como la información obtenida de la experiencia del ejercicio de proyectos anteriores en la empresa o negocio.

La duración de una actividad se puede plantear como una función de probabilidad del cumplimiento de la tarea. Por lo general el cumplimiento de una tarea en tiempo se encuentra en un intervalo entre el 20% y el 50% de probabilidad, siendo el 50% una estimación optimista en la mayoría de los casos. La Figura 2.18 nos muestra las funciones de probabilidad del cumplimiento de una tarea en tiempo. Para el caso optimista (a) la probabilidad de cumplimiento de la tarea es de 50%. Un caso más realista (b) muestra una función de probabilidad con un 20% de cumplimiento de la tarea.

No siempre es posible obtener funciones de probabilidad exactas para cada actividad. En realidad la manera de obtener una función precisa de probabilidad para la duración de cada actividad es realizando una *Estimación paramétrica*. La estimación paramétrica utiliza una relación estadística entre los datos históricos para calcular una estimación de parámetros de costo, duración y esfuerzo.

Existe un criterio para calcular la duración estimada de una actividad que considera el grado de incertidumbre y de riesgo de la estimación. Este criterio es el más utilizado por los administradores de proyectos. La *Estimación por tres valores* surge de la *Técnica de revisión y evaluación de programas*, mejor conocido como método PERT, y contempla tres valores estimados para definir un rango aproximado de duración de la actividad:

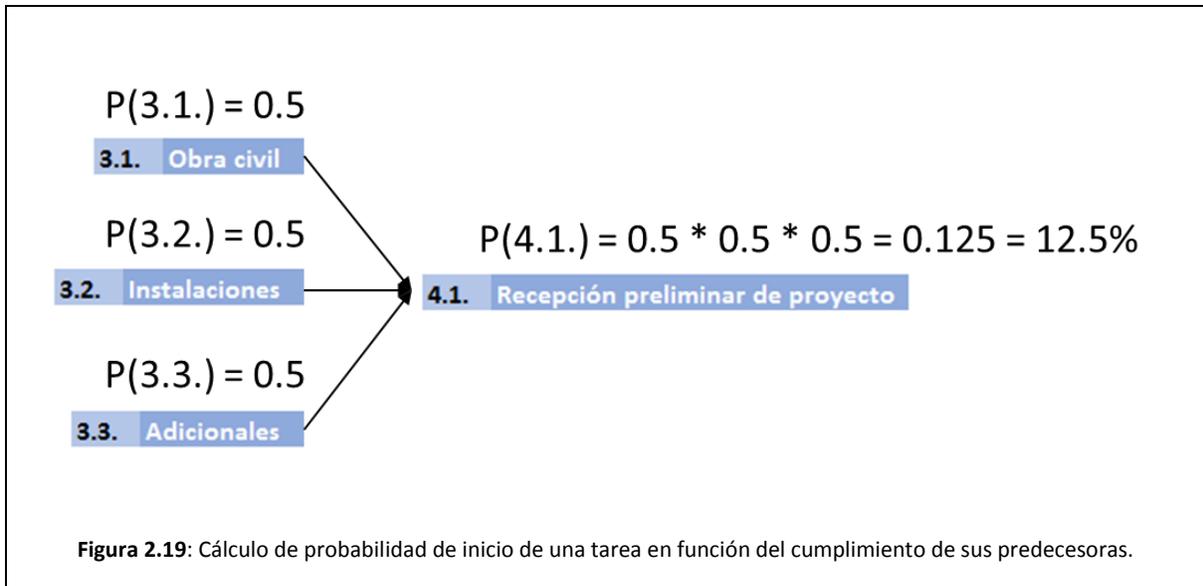
- **Más probable t_M** : Es la duración de la actividad en función de los recursos que probablemente se asignarán, de su productividad, las expectativas realistas de su disponibilidad, de las dependencias externas y posibles interrupciones.
- **Optimista t_0** : Es la duración de la actividad basada en el análisis del mejor escenario posible para esa actividad.
- **Pesimista t_p** : Es la duración de la actividad basada en el análisis del peor escenario posible para esa actividad.



La duración esperada t_E de la actividad utilizando el promedio según el método PERT se expresa en la siguiente ecuación:

$$t_E = \frac{t_O + 4t_M + t_P}{6}$$

Cuando se genera un cronograma de actividades es necesario tener en cuenta que las probabilidades de cumplimiento en tiempo de las actividades ponen en riesgo el cumplimiento de los entregables generales, es decir de las actividades generales y del proyecto mismo. Para ejemplificar la idea, la Figura 2.19 muestra las actividades 3.1, 3.2, y 3.3 de nuestro proyecto; según el diagrama PDM (Figura 2.17) el inicio de la actividad 4.1 depende del cumplimiento de las tres tareas predecesoras antes mencionadas. Si tomamos en cuenta los tiempos optimistas para el cumplimiento de las actividades y pensamos que la probabilidad de terminarlas en ese tiempo es del 50%, la probabilidad de que la tarea 4.1 pueda empezar a tiempo es tan solo del 12.5%.



Para solventar esta situación generalmente se colocan protecciones de tiempo en cada actividad de manera que la probabilidad de terminarla a tiempo sea la mayor posible. El rango de tiempo de protección por actividad generalmente aceptado oscila entre el 50% y el 100% del tiempo de la tarea. Para el caso optimista esto representa una probabilidad entre el 90% y el 100% para el cumplimiento de la tarea. En el caso pesimista esto eleva la probabilidad de cumplimiento de la tarea entre el 50% y el 80%.

Si generamos la ecuación PERT para la duración esperada de tareas con protección de tiempo de 50% obtenemos lo siguiente:

$$t_E = \frac{t_O + 4t_M + t_P}{4}$$

La ecuación PERT para la duración esperada de tareas con protección de tiempo de 100% es:

$$t_E = \frac{t_O + 4t_M + t_P}{3}$$

2.2 Teoría de Restricciones y administración de proyectos por Cadena Crítica

Eliyahu M. Goldratt (1947-2011) fue un físico y empresario israelí que en 1984 publicó una novela llamada *La Meta*²⁰. En ella se describe la situación de una planta de producción en un momento de crisis. Goldratt a través de la reflexión de los personajes de la historia y el desenvolvimiento de la trama expone los puntos esenciales de lo que después se conocería como la *Teoría de Restricciones TOC (Theory of Constraints)*. Hoy en día TOC se emplea a nivel académico y empresarial en diversos casos de estudio relacionados con la administración de operaciones y en la administración de proyectos mediante el *Método de Cadena Crítica*, el cual es una adaptación de la teoría en la práctica de la administración de proyectos²¹.

El antecedente sobre el cual se erige la TOC es el planteamiento de un problema común para la operación de todas las empresas actuales, ¿cuál es la meta? En este sentido el planteamiento a dicha pregunta presume que suele ser común en las empresas el no tener claridad en cuanto a lo que su operación es capaz de realizar y obtener bajo sus circunstancias particulares. De ahí que se pierda perspectiva sobre cuáles son las limitaciones o *restricciones* en la operación de la empresa y en qué medida se vería mejorada la eficiencia de dicha operación si se realizaran acciones con la finalidad de disminuir esas limitaciones.

Una tendencia usual en los negocios actuales de cualquier índole es la inversión en activos relacionados con nuevas tecnologías, nuevas herramientas y nuevos métodos de gestión, en busca de obtener mejores rendimientos incrementando la productividad de su operación. El tema no es muy diferente cuando se habla de proyectos. El negocio de la construcción actual está basado en un esquema de tres ejes principales: costo, alcance y tiempo; también se suele referir como las *3P*: plazo, prestaciones y presupuesto. Las empresas constructoras en México y el mundo invierten grandes cantidades de capital en herramientas y sistemas informáticos de gestión, procesos corporativos y recursos humanos enfocados directamente a la Gestión de la Integración y Alcance del Proyecto, Gestión del Tiempo, Gestión de Costos, Gestión de la Calidad, Gestión de los Recursos Humanos y Gestión de Riesgos entre otros. La razón es simple, la competencia entre las empresas por ser la más rentable del mercado determina la sobrevivencia de la misma.

La Teoría de Restricciones plantea los siguientes puntos principales:

1. **Identificar la limitación o restricción del sistema:** En todo sistema, ya sea de producción o de cualquier índole, existe un proceso que representa una limitación o restricción que influye de manera directa y definitiva en el producto final del sistema. En otras palabras, todos los procesos del sistema se ven limitados en algún punto por causa de este “eslabón

²⁰ (Goldratt, *La Meta: Un Proceso de Mejora Continua*, 2005)

²¹ (Goldratt, *Cadena Crítica*, 2001)

más débil”. He de ahí la importancia de identificarlo con claridad y tener presente con exactitud cuál es la parte del sistema que representa o representará una debilidad.

2. **Explotar la o las limitaciones del sistema:** Una vez identificada la restricción, es necesario llevarla a su capacidad máxima con el fin de determinar el resultado del sistema en función de dicha capacidad. Así es posible tener una idea precisa de los alcances del sistema tal y como es.
3. **Subordinar todos los procesos a la limitación del sistema:** Se refiere a poner todos los procesos del sistema en función de la limitación debido a que ésta no permitirá que se tengan resultados más allá de su capacidad. Es innecesario que los demás procesos del sistema tengan mayor capacidad que la limitación, ya que eventualmente sus excedentes causarían perjuicios de costo o de tiempo para el resultado final del sistema.
4. **Elevar la capacidad de la limitación:** Es necesario, una vez que se identificó la limitación, trabajar sobre ella. Esto quiere decir simplemente mejorarla; si existe una debilidad en el sistema es necesario fortalecerla de modo que ésta deje de serlo.
5. **Regresar al punto número uno:** Al momento de reforzar las limitaciones en el “eslabón más débil”, eventualmente éste dejará de serlo; convirtiendo a otro proceso del sistema en la nueva restricción del mismo. Por lo tanto es necesario volver al punto número uno, llevar a cabo nuevamente los puntos subsecuentes y así mejorar el sistema hasta un punto en que las limitaciones sean mínimas.

El PMI dentro de su norma tiene prevista la diferencia entre lo que es un proyecto y lo que es *trabajo operativo*. En ambos casos se trata de trabajo que debe ser realizado por personas dentro de la organización con el propósito de alcanzar una serie de objetivos y comparten ciertas características:

- Se presentan restricciones operativas o de recursos
- Ambos deben llevar una planeación estratégica
- Deben ser ejecutados, supervisados y controlados.

La diferencia radica principalmente en que el trabajo operativo es continuo y produce servicios, resultados o productos repetitivos. Los proyectos son temporales y tienen un final. Es necesaria la identificación del eslabón más débil en el sistema y posteriormente implementar una metodología específica para contrarrestar la debilidad. Una vez que se tiene resuelta esa parte puede procederse a la ejecución del proyecto. La *ruta crítica* de un proyecto es la línea de procesos sucesivos más larga e importante y que afecta de manera decisiva el resultado final del mismo. Esto quiere decir que cualquier retraso en alguno de los procesos de la ruta crítica significaría un retraso en la totalidad del proyecto. Por lo tanto, comúnmente se adiciona un búffer o periodo de seguridad que permite cierta holgura en cada uno de los procesos del proyecto. Sin embargo de

nada sirve emplear búffers o periodos de seguridad para cada uno de los procesos ya que en algún punto del desarrollo la restricción del sistema o “eslabón más débil” provocará un retraso total en el proyecto.

La solución que propone TOC para el conflicto general en la gestión de proyectos se expone en la metodología de *Cadena Crítica CCPM (Critical Chain Project Management)* y se basa en las siguientes reglas:

- Las estimaciones de tiempo no se deben convertir en compromisos.
- Las protecciones de tiempo deben ser globales y no locales. Lo importante es proteger el proyecto como un todo y no cada tarea.
- Los imprevistos deben absorberse con amortiguadores de tiempo (*buffers*), los que fijarán las prioridades durante la ejecución.

La Cadena Crítica es un concepto que viene a sustituir al de ruta crítica. Sin embargo, después de hacer el análisis del mismo por TOC y aplicar su metodología, aparece como un problema el hecho de que dos procesos o recursos se encuentren en un traslape temporal. La cadena crítica busca definir una nueva ruta de acción en el proyecto buscando ejecutar cada proceso del mismo, independientemente de la ruta crítica original y del orden de procesos originalmente planteado.

El análisis por medio de Cadena Crítica se basa en el control de los tiempos de entrega de un proyecto, y como su nombre lo indica, considera al proyecto como una cadena, como un total. Por lo tanto, el búffer determinante es el búffer total del proyecto, o en su defecto de la ruta crítica.

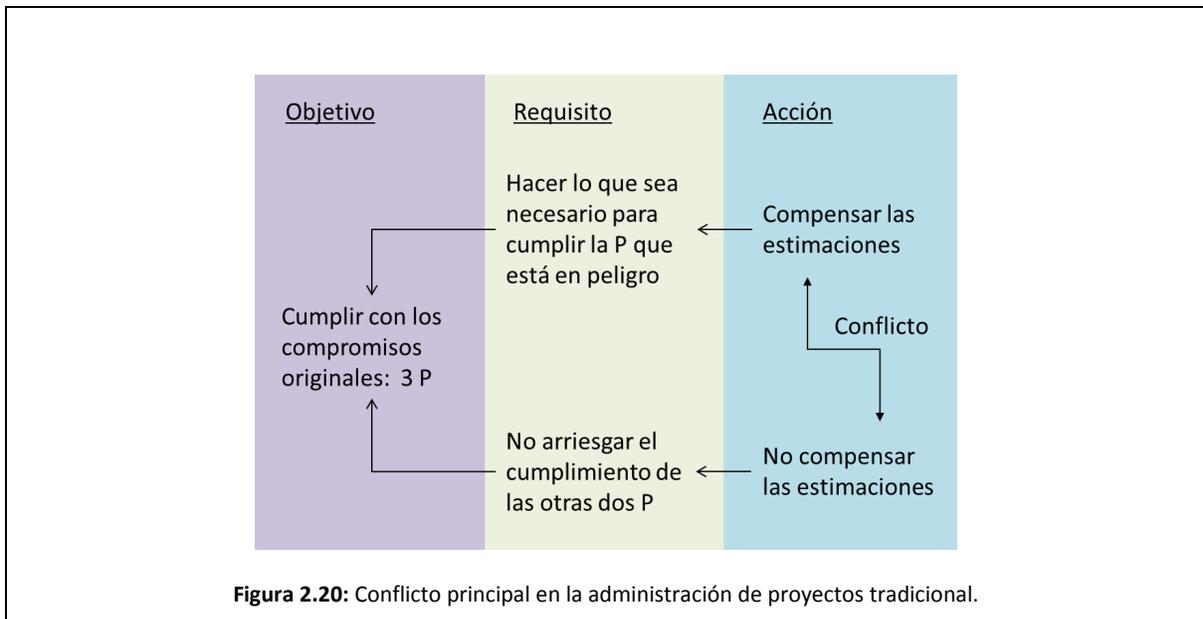
Ya que los tiempos de entrega del proyecto son lo más importante en el análisis por cadena crítica es pertinente utilizar búffers de seguridad para las sucesiones de procesos que, aunque no forman parte de la ruta crítica, desembocan en ella al término de las mismas. Así se asegura que, independientemente de ser cadenas aisladas de la ruta crítica, no se retrasen lo suficiente como para afectarla. Naturalmente el búffer se aplica al final de cada cadena y no para cada proceso de la misma. Es decir, existe un solo búffer de seguridad al final de cada cadena y se encuentra antes de su intersección con la ruta crítica.

TOC es un enfoque de gestión empresarial, sin embargo en la gestión de proyectos es posible aplicar los mismos fundamentos. Si bien es cierto que cada proyecto es único y no hay uno igual al otro, los problemas generalmente son los mismos. Una de las ideas medulares en TOC es que si un problema es persistente en un tiempo determinado es porque hay un conflicto de fondo que impide resolverlo.

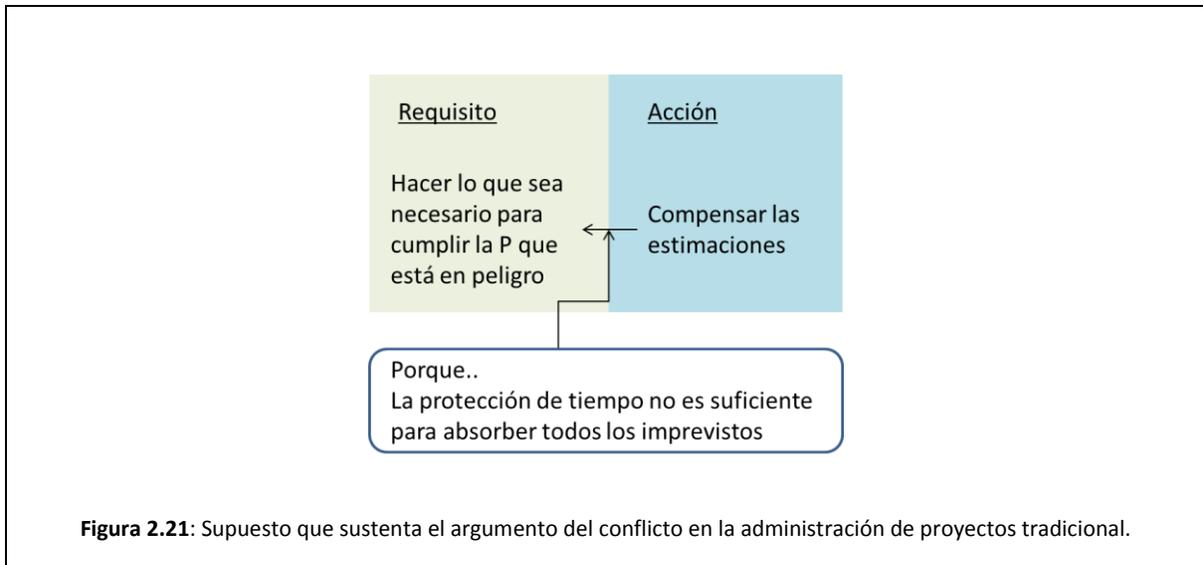
La administración tradicional de proyectos conlleva un conflicto principal: El objetivo de todo proyecto es cumplir con los compromisos principales en costo, tiempo y alcance (las 3P). La Figura 2.20 describe el principio del conflicto. Si surge un imprevisto que pone en peligro el cumplimiento de una de las tres P, se debe de tomar acción para corregirlo. Pero por otro lado, dichas acciones no deben poner en peligro las otras dos P. Como ejemplo podemos suponer un proyecto en el cual

un proveedor se atrasa con la entrega de un insumo. El retraso podría poner en el peligro la P de *plazo*, y el conflicto está en recuperar o no el tiempo perdido. El recuperar el tiempo perdido puede implicar el tener que incorporar más capacidad de trabajo, lo que implicaría un sobre costo y pondría en peligro la P de *presupuesto*; o bien, recortando el alcance del proyecto lo que implicaría poner en riesgo el cumplimiento de la P de *prestaciones*.

En el enfoque de TOC, siempre que exista un objetivo común, existe una solución de tipo ganar-ganar. Para obtener la solución es necesario identificar la lógica del conflicto, una vez identificada la lógica basta con encontrar la manera de invalidar alguno de los supuestos o creencias que soportan dicha lógica y así poder satisfacer el objetivo y ambas condiciones necesarias de forma simultánea.



En la Figura 2.21 observamos que el supuesto que sustenta el argumento del conflicto es que “la protección de tiempo no es suficiente para absorber todos los imprevistos”. En la manera tradicional de gestionar proyectos esta es una realidad que siempre se presenta, sin embargo para TOC esta es una **falsedad**. En la gran mayoría de proyectos las protecciones de tiempo que hay sí son suficientes, el problema está en que generalmente se desperdician. Esto sucede debido a que el enfoque que se toma para terminar un proyecto a tiempo es el de tratar de terminar cada tarea a tiempo, lo que lleva a que las protecciones de tiempo para cada tarea se desperdicien y eventualmente surja un imprevisto que ponga en riesgo el cumplimiento de alguna de las 3P.



Goldratt realizó el análisis del conflicto genérico que se presenta en proyectos, que “las protecciones de tiempo no son suficientes para absorber todos los imprevistos”. Para el análisis se plantearon cuatro factores que intervienen en el conflicto. La práctica común de administración de proyectos tiene la premisa de que para terminar un proyecto a tiempo, es necesario terminar las tareas a tiempo, sin embargo, hay dos factores iniciales que determinan el que esta premisa no se cumpla: la *Ley de Parkinson* y el *síndrome del estudiante*. Si se adicionan a la ecuación dos de las características propias de los proyectos como lo son *la integración de tareas* y los *recursos multitareas* hacen que las protecciones de tiempo en las tareas se desperdicien.

La Ley de Parkinson²² es un fenómeno estudiado y conocido que establece que el trabajo se expande hasta ocupar todo el tiempo destinado a su realización. En general para toda tarea a la cual se estima un tiempo determinado para su realización (incluido el tiempo de protección) el esfuerzo se distribuye de manera homogénea en el intervalo de tiempo de manera que se ocupe la totalidad del tiempo para la realización de la tarea. De esta manera a pesar de que se prevean protecciones por tarea, estos siempre se desperdician. Es común en la gestión de proyectos que una tarea que se termina antes del tiempo estimado en un proyecto, se estime con un tiempo menor para los proyectos subsecuentes como exigencia de los interesados en el proyecto. Esta situación promueve que los responsables de cada actividad en los proyectos tiendan a agotar el tiempo máximo de cumplimiento de las mismas, con la intención de no ver reducido el tiempo de las tareas similares en proyectos subsecuentes. De esta manera no existe ningún incentivo para la entrega temprana y por lo tanto el trabajo ocupa todo el tiempo disponible.

El síndrome del estudiante es un fenómeno muy habitual en las tareas académicas. Es común observar que los estudiantes realizan poco esfuerzo al inicio del período que disponen para estudiar, o completar alguna tarea. Al percibir lejana la fecha de entrega, se toman las cosas con

²² (Parkinson, 1957)

mucha calma y cerca de la fecha de entrega se intenta compensar el tiempo perdido. En el ámbito laboral esta situación se presenta en infinidad de proyectos sobre todo cuando las duraciones son relativamente largas en relación a la duración total del proyecto. Las tareas que se perciben muy largas son las más susceptibles que se presente este fenómeno.

Las características propias del proyecto que suman al desperdicio de las protecciones de tiempo por tarea, así como la terminación tardía de las mismas, son dos: la integración de tareas y la multitarea.

La integración de tareas está relacionada con la probabilidad de que más de una tarea se cumpla como requisito para que comience una tarea posterior. En este sentido es suficiente con que una de las tareas predecesoras sufra un inconveniente para que detenga el inicio de la tarea integradora. La incertidumbre de cumplimiento de las tareas predecesoras afecta la estimación de la tarea integradora, ya que como se vio en la Figura 2.19, sus probabilidades de cumplimiento es producto de las probabilidades de las tareas predecesoras y se corre el riesgo de perder las protecciones de tiempo. Los adelantos en algunas tareas predecesoras no compensan los atrasos de otras cuando es requisito que todas se completen para iniciar con la tarea integradora, pero los retrasos si afectan íntegramente la tarea dependiente de ellas.

La multitarea es la acción de realizar varias tareas simultáneamente. Aun cuando existan recursos altamente eficientes que puedan realizar varias actividades al mismo tiempo, la realidad es que la calidad de los resultados de las actividades no siempre es satisfactoria. Hablando de la atención que puede prestar un recurso para realizar varias actividades simultáneas, esta alterna de modo secuencial entre las tareas, no en paralelo. Lo que quiere decir es que en realidad ningún recurso es capaz de realizar más de una actividad al mismo tiempo, puede estar alternando entre una y otra, quizás a gran velocidad, pero no al mismo tiempo. La multitarea se convierte en perjudicial cuando el tiempo en la alternancia entre actividades simultáneas de un recurso se incrementa, ya que se debe emplear tiempo para retomar el hilo de lo que se ha trabajado anteriormente y éste es mayor en la medida en que el tiempo desde que se dejó y hasta que se retoma es mayor.

Para resumir lo antes comentado, la Figura 2.22 muestra el diagrama lógico con las consecuencias de la práctica tradicional de administración de proyectos. En este orden de ideas, las estimaciones se convierten en compromisos. Los compromisos hacen que se incluyan tiempos de protección generosos, que a su vez causa que las tareas no comiencen a máxima velocidad y que se ocupe todo el tiempo para completarlas. Los adelantos en las tareas nunca se transfieren, pero cuando surgen atrasos, estos sí se transfieren en su totalidad. Esto provoca que se excedan los presupuestos, las fechas límites o que se deba recortar el alcance.

La solución que plantea TOC comienza con responder sistemáticamente a las siguientes preguntas: ¿Qué hay que cambiar? ¿Hacia qué hay que cambiar? ¿Cómo se debe realizar el cambio?

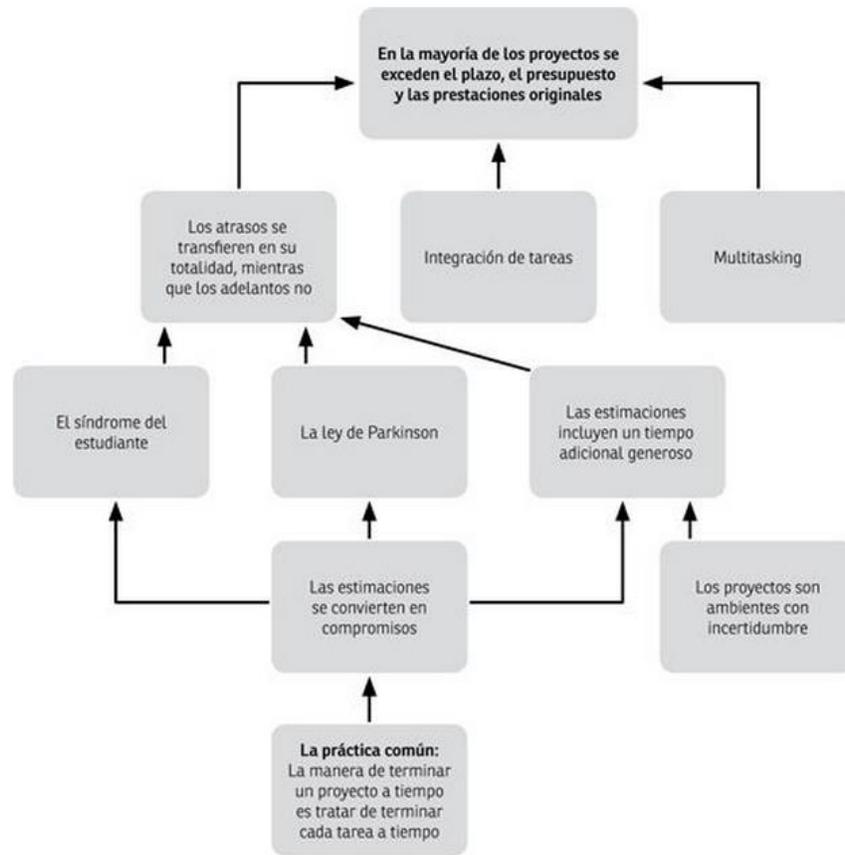


Figura 2.22: Diagrama lógico de la práctica común de administración de proyectos. (Bianchi, 2013)

La respuesta a estas interrogantes deben cumplir con los siguientes criterios:

- Las estimaciones no deben convertirse en compromisos.
- Los mecanismos de desperdicio de las protecciones deben ser eliminados.
- Los adelantos y los atrasos deben poder compensarse entre sí.
- La multitarea perjudicial debe ser eliminada o reducida de manera significativa.

Los resultados que se esperan de implementar TOC en la gestión de proyectos son:

- Los proyectos tengan una probabilidad muy alta de terminar en el tiempo establecido, asegurando el costo y el alcance.
- Los proyectos se realicen más rápido que con la metodología tradicional.
- Las personas que dirigen proyectos tengan un alto nivel de control.

2.3 Gestión de proyectos para obras de telecomunicaciones.

En el negocio de la construcción de obras del Sector Telecomunicaciones la naturaleza de los proyectos difiere en ciertos aspectos de los proyectos de construcción de otros sectores como el Sector Edificación, Sector Vivienda, Sector Infraestructura o Sector Petrolero, por mencionar algunos. La generalidad de los proyectos en telecomunicaciones se caracteriza por tener un tiempo de ejecución de la obra significativamente más corto que los proyectos de los otros sectores. Esto repercute en la manera que debe costearse cada proyecto y en la manera en la que debe plantearse la planeación estratégica. Generalmente las empresas se administran a razón de ciclos mensuales de operación dentro de un esquema de ejercicios fiscales anuales.

Proyectos grandes de construcción implican tiempos de ejecución de obra mayores a un mes para cada una de las etapas del proyecto, y que en conjunto resultan en un tiempo de vida del proyecto que puede ir de unos pocos meses hasta algunos años. En el caso de los proyectos de telecomunicaciones, dependiendo del tipo de trabajo a realizar, las obras pueden durar desde unas pocas horas hasta algunos días y en ocasiones unos pocos meses.

Los proyectos de telecomunicaciones, a diferencia de otros tipos de obra, emplean muy poca gente para su construcción. Generalmente se trata de pocas especialidades a diferencia de otros proyectos que emplean diversas especialidades y técnicas cohabitando en el mismo tiempo y espacio. La gerencia y supervisión en este sentido se debe visualizar desde una óptica diferente, en lugar de requerirse gerenciamiento y supervisión por especialidad dentro de un solo frente de trabajo en una sola fase del proyecto, los proyectos de telecomunicaciones requieren de una supervisión para muchos proyectos simultáneos abarcando todas las especialidades que el proyecto requiera.

En este punto se hace hincapié en la premisa de esta tesis, la construcción de proyectos en telecomunicaciones tiene una gran similitud con los procesos industriales (o trabajo operativo).

La Tabla 2.1 muestra la comparativa entre las características de un proyecto de telecomunicaciones y los proyectos de otros sectores.

Característica	Sector Telecomunicaciones	Otros Sectores
Volumen de producción	Mensual	Por fase de proyecto
Gestión de costos	Por un grupo de obras	Por fase de proyecto
Gestión de alcance	Por un grupo de obras similares	Por trabajo específico y único
Variación en tiempos de ejecución de tareas similares	Muy baja	Muy alta

Definición de la metodología propuesta

La metodología que se plantea en este documento tiene como propósito integrar un *Plan para la dirección de operación*, el cual es un documento que describe el modo en el que el proyecto, o proyectos, serán ejecutados, monitoreados y controlados. Es importante dejar muy claro que esta metodología no pretende descartar las políticas que establece el PMI, por el contrario se retoman los elementos más valiosos y se complementan con los fundamentos de TOC.

En la fase de inicio es importante realizar un proceso de licitación lo más formal posible y se deben contemplar algunos aspectos importantes:

- El propósito o justificación del proyecto.
- Los objetivos medibles del proyecto.
- El alcance a nivel 1.
- El líder del proyecto y su nivel de autoridad.
- Los riesgos más importantes.
- Un presupuesto.

Es deseable que cuando el proyecto así lo amerite, o bien para cada tipo de operación (red de cobre, red de fibra óptica, red HFC, etc.), se genere un *acta constitutiva* el cual es un documento donde se establecen los aspectos mencionados.

La fase de planeación es de la misma manera de suma importancia para el inicio de cualquier operación, sin embargo debe verse como un proceso iterativo que no es lineal sino que debe estar en constante mejora con cada iteración. Con esto me refiero a que si en la creación del *programa de suministros*, por ejemplo, se identifican requisitos que no se contemplaron en el presupuesto, éste deberá actualizarse. Tampoco debe considerarse que las fases del proyecto son lineales (o no necesariamente) ya que una de las ideas fundamentales de TOC es la mejora continua y la iteración de actividades en busca de esa mejora. Tampoco las actividades entre fases son lineales sino responden a procesos iterativos que sufren traslapes.

Hablando sobre la gestión del alcance, nos referimos a lo que el proyecto entregará (el cual debe ser absolutamente medible) y al trabajo necesario para lograrlo. En este sentido es común que no se tenga una comprensión correcta de lo que es un entregable y por ende no se haga una buena gestión al respecto. El entregable responde a un resultado único y tangible que se obtiene como resultado de un trabajo y que cumple con determinados requisitos. En este orden de ideas, primero se determinan los requisitos, después se establece el entregable y finalmente el trabajo que debe realizarse. Es importante que se obedezca este orden ya que es una mala práctica pero común el que se pierda tiempo en discutir un entregable cuando no hay certeza de los requisitos, lo que no siempre es una tarea sencilla pero sí de suma importancia. La importancia de establecer

con claridad los requisitos también considera el no tener en cuenta requisitos que no se pueden cumplir para evitar problemas posteriores con los interesados del proyecto.

Una vez que se han determinado los requisitos y se establecen los entregables se procede con la descripción del proyecto en forma de EDT. Establecer los entregables y crear la EDT son procesos que se deben hacer de forma simultánea para eficientarlos y evitar problemas de actividades incoherentes o redundantes en ambos. En la definición del alcance y EDT deben considerarse dos tipos de componentes:

- **Nivel de esfuerzo:** Son las actividades de soporte que no producen productos finales
- **Discreto:** Son actividades que producen productos finales o resultados que pueden ser medidos y planificados.

Para ejemplificar la idea, de nuestra EDT de un proyecto de construcción (Figura 2.16) podemos establecer como un componente de nivel de esfuerzo a la tarea 2.3, ya que la procura de recursos es un proceso que no tiene un resultado único y que además es una actividad continua, mientras que la tarea 2.2 es discreta ya que la ingeniería del proyecto si comprende una serie de planos y documentos que representan un resultado único y que es finito (a menos que hubieran cambios en el proyecto, en cuyo caso éstos se convierten en una nueva componente discreta del proyecto).

La gestión del tiempo en esta propuesta de metodología, difiere en mayor manera de lo que establece el PMI. Uno de los puntos importantes que considera el PMI en la fase de planeación es la creación de un cronograma de proyecto. Esto es un error importante ya que, por una parte, cuando los entregables no están bien definidos se pueden incluir actividades que no son necesarias y que agregan costo, trabajo y tiempo al proyecto. Por otra parte, si los proyectos tienen un alto grado de incertidumbre y al mismo tiempo un alto nivel de descomposición de trabajo y surge un imprevisto, todas las tareas declaradas inicialmente deben cambiar o posiblemente desaparecer y ser reemplazadas por otras. Esto implica que el tiempo, costo y esfuerzo en la creación del cronograma no se aprovecharán. En el caso particular de las tareas de ejecución propias de la obra, como lo puede ser la canalización, sembrado de ducto e inmersión de cable (telefónico, cobre, fibra, etc.), es muy común que a pesar de que exista una traza de línea en el plano, al momento de abrir el suelo ya en sitio se encuentren otros ductos, cañerías o materiales no previstos que requieran de cambiar la ruta de la línea planificada por otra para cubrir el enlace requerido. Este caso es tan común como paradigmático para las personas que deben operar estas actividades, ya que el tener un cronograma fijo y detallado restringe su creatividad para idear soluciones y como no se esperaban los 'imprevistos', pocas veces están preparados para cuando éstos se presentan.

El segundo error relativo al cronograma, es pensar que mientras más actividades se tengan es mejor. La realidad es que los proyectos en telecomunicaciones son tan prototípicos y de corta duración que lejos de ayudar, dificultan la gestión.

Aclarado lo anterior, y con un entendido correcto del significado de entregable, se deben secuenciar las actividades.

Para esto generaremos el PDM siguiendo los siguientes pasos:

1. Crear una actividad general y ficticia llamada *Todas las actividades terminadas*.
2. Armar grupos de actividades a partir de los paquetes de trabajo.
3. Establecer relaciones de precedencia para cada grupo de actividades. Sólo utilizaremos relaciones FI (fin a inicio).
4. Establecer relaciones entre grupos.

La estimación de tiempo y recursos también lo haremos un poco diferente de como lo establece el PMI. Cuando hablamos de estimar recursos nos referimos a establecer el tipo y las cantidades de materiales, personas, equipos o suministros requeridos para ejecutar cada actividad. Hablar de estimar actividades es establecer aproximadamente la cantidad de períodos de trabajo necesarios para realizar cada actividad con los recursos estimados. Ambas estimaciones deben contemplar lo siguiente:

- Eliminar o reducir la multitarea.
- Eliminar o reducir el síndrome del estudiante y la ley de Parkinson.

Para eliminar o reducir la multitarea se debe considerar el 100% del esfuerzo en cada actividad. Es decir si se considera un recurso que completa una tarea determinada en 10 días a un 50% de su tiempo asignado, se debe reducir a 5 días la duración de la tarea con una asignación del recurso en un 100%. Esto no siempre es sencillo sobre todo si la estructura de la organización no es proyectizada, de ahí la importancia de considerarse desde un inicio para que el líder de proyecto pueda tener buena gestión en la procura de recursos. Generalmente es mejor tener un recurso al 100% por una semana que tenerlo 3 semanas a un 33% de su disponibilidad.

El síndrome del estudiante y la ley de Parkinson están relacionados con la duración de las tareas. En este sentido es importante considerar que **nunca podemos saber cuánto tiempo demandará cierta actividad**. Esto es debido a que nunca podemos prever lo que ocurrirá en el futuro y por lo tanto no podemos prever los imprevistos ni su afectación. De esta manera la estimación en la duración de las actividades se hace con valores aproximados, nunca con exactitud. Las actividades más prototípicas del proyecto nos permiten tener más certeza de un valor aproximado más cercano a la realidad ya que su grado de incertidumbre es menor (la dispersión de datos es pequeña). En este sentido siempre es mejor manejar datos cercanos a la realidad, nunca exactos y sin generar compromiso con fechas de entrega, pero si aproximados al valor real **sin protecciones**. Es importante despojar a todas las actividades de sus protecciones ya que la intensión con esto es tener un enfoque de paquete de trabajo y no de actividad individual. En el caso de no conocer un valor aproximado real, al que llamaremos *estimación crítica*, y solo conocemos valores 'protegidos', se deberá considerar la mitad de ese tiempo. Esta aproximación es agresiva por lo que es posible que no se tenga aceptación por parte de los involucrados, en este caso es importante considerar el mejor escenario donde todas las variables consideran el caso optimista.

Es importante en este punto distinguir que cadena crítica y ruta crítica no son lo mismo, tampoco equiparables ya que ruta crítica sí establece una secuencia de actividades con duraciones fijas y cadena crítica no, va un poco más allá, se trata de un proceso de monitoreo y control que no pretende establecer fechas o hitos sino el constante mejoramiento de todas las variables de control. En este sentido la estimación del costo contempla dos tipos de actividades: aquellas cuyo costo está en función del tiempo y aquellas que no. En aquellas cuyo costo no varía con el tiempo generalmente son insumos que se valoran en el mercado, como por ejemplo un equipo o una máquina y que no afectan al proyecto a pesar de tener estimaciones agresivas de tiempo para la actividad. Las que si varían con el tiempo son generalmente dependientes de un recurso humano, como la instalación de dicho equipo, ya que su costo aumenta conforme la duración aumenta. En estos casos deben considerarse los costos tomando en cuenta las estimaciones críticas.

Una vez tomado en cuenta esto, se realiza el cronograma. Éste debe considerar una protección global de costo y una protección global de tiempo los que llamaremos *buffer de costo del proyecto* y *buffer de tiempo del proyecto*.

La planificación del riesgo es el otro tema importante a considerar en esta metodología. A pesar de que gestionar los riesgos es de gran importancia, comúnmente no se toma mucho en cuenta ya que se piensa que con las protecciones de tiempo y costo por tarea el problema se soluciona. La realidad es que no. Un riesgo es un evento o situación incierta que si llega a ocurrir afectará al proyecto de forma negativa o positiva. Se deben minimizar los efectos negativos y aprovechar los efectos positivos. La manera de dimensionar el riesgo es con la relación de su probabilidad y del impacto que tendrá en el proyecto:

$$\text{Riesgo} = \text{Probabilidad de ocurrencia} * \text{Impacto}$$

El objetivo es abordar y manejar los riesgos antes de que se vuelvan problemas. Se debe estar preparado para ellos y se debe saber cómo manejarlos. Todo esto va a depender del nivel de riesgo y de la tolerancia al mismo. Algo que debemos considerar es que a pesar de que consideremos que nuestros riesgos son bajos porque las probabilidades de ocurrencia son bajas, casi siempre se presentan, lo que se conoce como Ley de Murphy "*Si algo puede salir mal, va a salir mal*".

El objetivo de la planeación debe ser el de eliminar los imprevistos que no son inherentes al proyecto y tener una base sólida para entonces poder enfocarse y tomar las decisiones de gestión más adecuadas ya en la ejecución del mismo. Para esto es importante considerar que el plan de ejecución el cual involucra al cronograma y los recursos debe someterse a los 5 puntos de TOC hasta que se haya sintetizado al máximo y se haya reducido al máximo el tiempo de duración del proyecto y los costos asociados al mismo. Como lo dice el punto número 1 de TOC, es necesario identificar la restricción del sistema. En este caso la restricción es la cadena crítica. Goldratt definió

como cadena crítica a la secuencia más larga de actividades de la red del proyecto, teniendo en cuenta tanto la dependencia de tareas como de recursos. Así la duración del proyecto es la duración de la cadena crítica más el buffer de tiempo del proyecto²³.

Recordar que sólo una es la restricción del proyecto, es decir sólo hay una cadena crítica, las demás son secundarias. Las tareas que forman parte de la cadena crítica son llamadas *tareas críticas*. Como sabemos, se debe operar en función de la restricción del sistema y en este sentido el líder del proyecto debe operar en función de sus tareas críticas. En cuanto a determinar el avance del proyecto, sólo se considerarán las tareas críticas. Esto representa una diferencia significativa con la gestión tradicional de proyectos ya que a pesar de que tareas secundarias representen esfuerzo y tiempo, no deben de reflejarse en el avance del proyecto. El buffer de tiempo de proyecto es un período de tiempo que se coloca al final del mismo y que lo protege de las variaciones que puede requerir el completar las tareas de la cadena crítica.

La manera en que se deben gestionar las tareas secundarias es, por un lado asegurar que la ejecución de estas no cause demoras en las tareas críticas, y por otro cuidar su costo. En este sentido, las tareas secundarias deben empezar lo antes posible pero sin elevar costos por tiempos muertos. Cuando una tarea crítica depende de una tarea secundaria se debe colocar entre ellas un *buffer de alimentación FB (Feeding buffer)* de manera que la tarea secundaria comience con el suficiente tiempo para ser concluida y que la tarea crítica no se vea afectada, ni antes ni después. Asignar un 50% del tiempo de la tarea secundaria como buffer de alimentación antes del comienzo de la tarea crítica es una buena estimación.

Al momento de hacer las iteraciones de TOC en el proyecto es importante considerar lo siguiente:

- El buffer de tiempo de proyecto no debe de recortarse.
- Las estimaciones agresivas no deben recortarse.
- Plantear desafíos imposibles.

Como último punto de la metodología estableceremos los indicadores para el monitoreo y control. Tradicionalmente, la administración de proyectos contempla los siguientes indicadores:

- Valor planeado (*PV*)
- Valor ganado (*EV*)
- Costo actual (*AC*)
- Presupuesto hasta la conclusión (*BAC*)
- Varianza del costo (*CV*)
- Varianza del cronograma (*SV*)
- Índice de desempeño de costo ($CPI = EV/AC$)
- Índice de desempeño de cronograma ($SPI = EV/PV$)

²³ (Goldratt, Cadena Crítica, 2001)

Estos indicadores corresponden a una técnica llamada *Gestión del valor ganado*, y su utilización es adecuada en proyectos grandes donde se justifique el gasto operativo. En ocasiones, manejar muchos indicadores no es benéfico ya que se corre el riesgo de perder el foco en lo que realmente es importante. Si retomamos la esencia de TOC, sabemos que por más complejo que sea el sistema (o proyecto) deben existir muy pocos elementos que lo determinan. Sabemos que la restricción del proyecto es la cadena crítica, pero si vamos más allá, en algún momento dado existirá una tarea crítica que es la que determina el desempeño del proyecto en su totalidad.

Los indicadores tienen la intención de decirnos si es necesario tomar alguna acción o no, en cuanto al desarrollo de las actividades críticas. Es importante considerar sólo el término de dichas actividades y no los avances parciales, ya que de nada sirve tener el 80% de todas las tareas críticas concluidas pero ninguna de ellas al 100%. La realidad en este caso es que a pesar de que la administración tradicional nos mostraría un avance del 80% del proyecto, para fines prácticos llevaríamos un 0%.

Los indicadores que utilizaremos son:

- **Avance de la cadena crítica:** Es el avance real medido en tiempo del cumplimiento de las tareas críticas terminadas. Por ejemplo, si tenemos cuatro tareas críticas de cinco días cada una que en total nos da un plazo de proyecto de 20 días y la primera tarea la terminamos en 10 días, recién ahí llevaríamos un 25% de avance a pesar de que ya haya transcurrido el 50% del tiempo total. El indicador de avance de la cadena crítica se calcula como:

$$\text{Avance de proyecto} = \text{tiempo de tareas concluidas} / \text{tiempo de la cadena crítica}.$$

- **Consumo del buffer de tiempo del proyecto:** Es el tiempo que hemos consumido del buffer de proyecto a término de determinada tarea crítica. En el ejemplo del punto anterior, con el avance de 25% habríamos consumido ya 5 días del buffer de proyecto. El indicador de buffer de proyecto lo calculamos como:

$$\text{Consumo de buffer} = \text{tiempo consumido del buffer} / \text{tiempo del buffer}.$$

Para poder saber si es necesario tomar acción relacionaremos ambos indicadores en un gráfico conocido como *fever chart* (gráfico de temperatura), como se muestra en la Figura 2.23. Cada reporte de estado está representado con cada punto en la gráfica. Si nuestra curva se encuentra en la zona superior, debemos actuar de inmediato ya que significa que la velocidad de consumo del buffer es mayor al progreso del proyecto. Si la curva se encuentra en la zona inferior quiere decir que el progreso de proyecto es mayor al consumo del buffer, en cuyo caso el proyecto va bien.

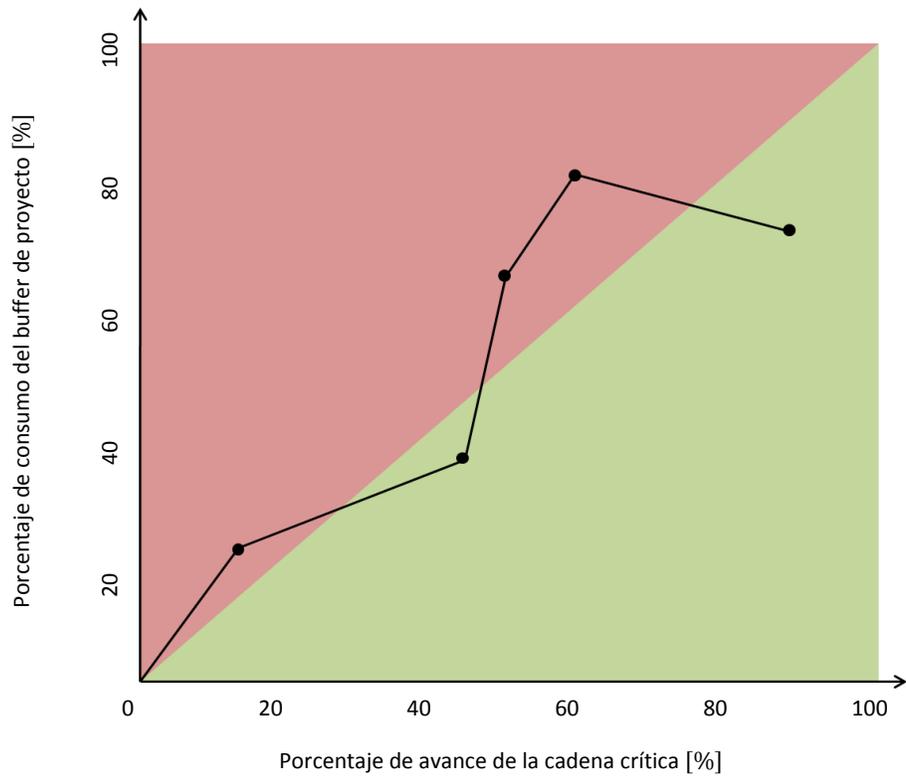


Figura 2.23: Grafico de temperatura para la evaluación de los indicadores de desempeño.

2.3.1 Construcción de red de telefonía.

Es momento de aplicar la metodología TOC a un proyecto de red telefónica. Para esto pensemos en la construcción de una red telefónica de fibra óptica. El alcance de este tipo de proyectos debe contemplar lo siguiente:

- Plazo de duración del proyecto.
- Presupuesto.
- Permisos y licencias.
- Distancia del enlace.
- Parámetros del enlace.
- Tipo de tendido de fibra óptica.
- Tipo de obra civil.
- Empalmes y conexiones.
- Mediciones y pruebas.
- Documentación requerida para la entrega.
- Liquidación del proyecto.

A partir de estos requerimientos es posible obtener las tareas críticas del proyecto y sus entregables. Retomaremos la EDT genérica de un proyecto de construcción y la aplicaremos a este proyecto. La Figura 2.24 nos muestra la EDT de proyecto donde podemos observar 5 paquetes de trabajo, cada uno a su vez con tareas a nivel 1 y nivel 2. En la administración tradicional deberíamos hacer un PDM con todas las tareas del proyecto, mientras más detalladas mejor. En este caso comenzaremos con definir cuáles son las tareas críticas y que dependencia existe entre ellas.

El PDM para este proyecto se muestra en la Figura 2.25. Según lo planteado en nuestra metodología TOC es necesario secuenciar sólo las actividades a nivel 1 con relaciones FI (final a inicio). En este sentido, sólo la actividad 2.1 *Carpeta de proyecto* tiene relación con el paquete de tareas 4 *Entrega de obra*, mientras que todas las demás actividades correspondientes al paquete de tareas 2 *Planeación* tienen relación con actividades del paquete de tareas 3 *Ejecución de obra*. De manera que la actividad 2.1 *Carpeta de proyecto* se deberá aislar, de igual manera que la actividad 4.2 *Entrega de proyecto a cliente* que es su sucesora, para considerarlas por separado como una cadena secundaria del proyecto. En el diagrama PDM que se muestra en la Figura 2.26 se identifican las tareas críticas. Es posible observar la cadena crítica la cual corresponde a la secuencia de los paquetes de tareas 1 *Licitación*, 2 *Planeación*, 3 *Ejecución*, las actividades 4.1 *Recepción preliminar* y 4.2 *Entrega al cliente* y el paquete de tareas 5 *Liquidación de obra*. La actividad 2.1 *Carpeta de proyecto* representa una cadena secundaria del proyecto. Este diagrama de dependencias no considera la dependencia de recursos, sólo la dependencia de cumplimiento de tareas.

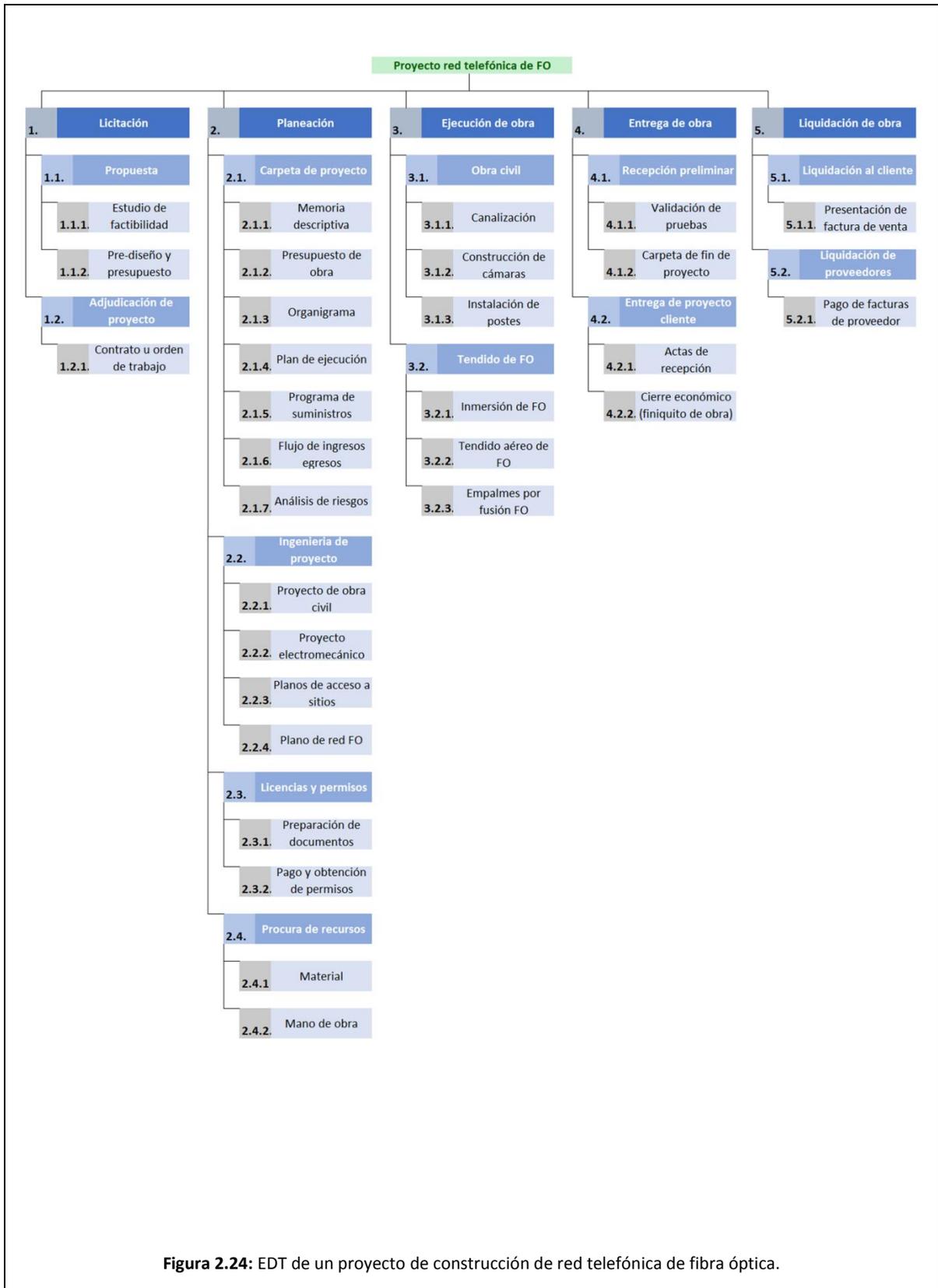
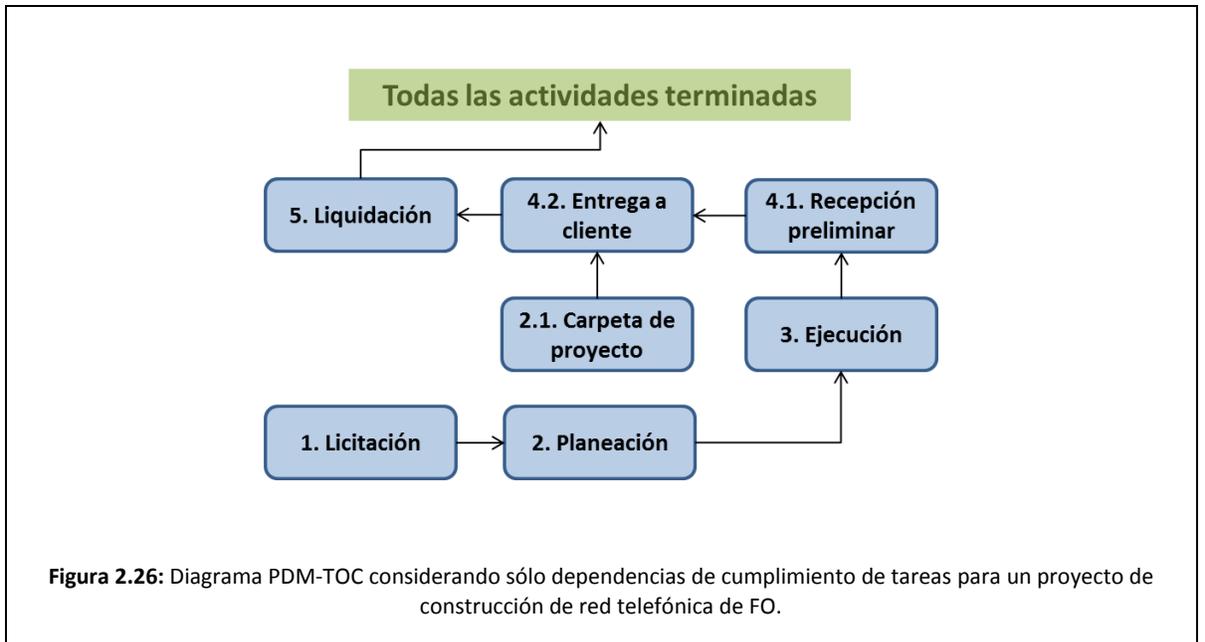
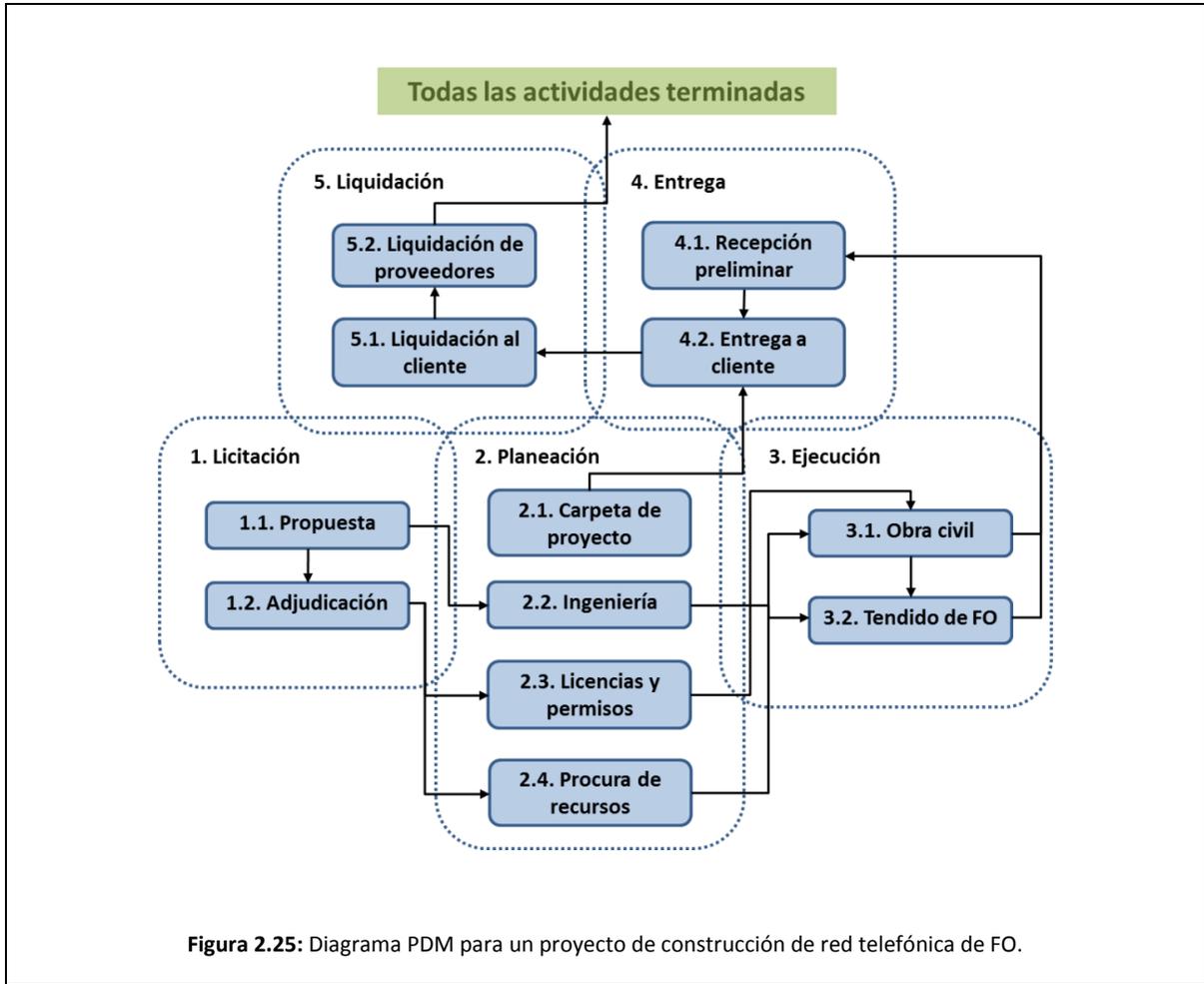


Figura 2.24: EDT de un proyecto de construcción de red telefónica de fibra óptica.



Los recursos que intervienen en este tipo de proyectos son:

- Líder de proyecto.
- Representante legal.
- Costos.
- Compras.
- Administración técnica.
- Ingeniería civil.
- Ingeniería de fibra óptica.
- Supervisión técnica.
- Liquidaciones.
- Mano de obra civil.
- Mano de obra de fibra óptica.
- Herramienta y equipo.
- Materiales.

Para identificar la dependencia de recursos asociamos las tareas a los recursos y los clasificamos por el tipo de componente (nivel de esfuerzo o discreto). La Tabla 2.2 muestra los recursos asociados a cada actividad y su entregable.

Actividad	Recurso	Tipo de componente	Entregable
1.1.Propuesta	Líder de proyecto, Administración técnica.	Discreto	Propuesta de proyecto
1.2.Adjudicación	Líder de proyecto	Discreto	Orden de trabajo o contrato
2.1.Carpeta de proyecto	Líder de proyecto, Administración técnica, Costos	Discreto	Carpeta de documentación de proyecto
2.2.Ingeniería	Ingeniería civil, Ingeniería telecom.	Discreto	Planos de ingeniería
2.3.Licencias y permisos	Representante legal	Discreto	Liberación de permisos y licencias
2.4.Procura de recursos	Compras	Nivel de esfuerzo	-
3.1.Ejecución de obra civil	Supervisión técnica, Mano de obra civil	Discreto	Terminación de obra
3.2.Tendido de fibra óptica	Supervisión técnica, Mano de obra de fibra óptica	Discreto	Terminación de obra
4.1.Recepción preliminar	Líder de proyecto, Supervisión técnica, Administración técnica	Discreto	Pruebas de OTDR y carpeta de fin de proyecto

4.2. Entrega a cliente	Líder de proyecto	Discreto	Finiquito de obra y actas de recepción
5.1. Liquidación al cliente	Liquidaciones	Discreto	Cobro de factura de venta
5.2. Liquidación de proveedores	Liquidaciones	Discreto	Pago de facturas de proveedores

Comúnmente se considera una estructura organizacional matricial en la cual tanto el líder de proyecto como el resto del equipo de trabajo atienden más de un proyecto de forma simultánea. El organigrama se muestra en la Figura 2.27. El encargado de liquidaciones, así como el representante legal, no dependen de la gerencia operativa por lo que ambos reportan de forma indirecta al líder de proyecto para cumplir con sus actividades específicas del proyecto. En el caso de liquidaciones, éste sólo interviene en el paquete de actividades 5 *Liquidación*, por lo que no afecta al diagrama PDM de la Figura 2.26 ya que dicha actividad ya es considerada como una tarea crítica.

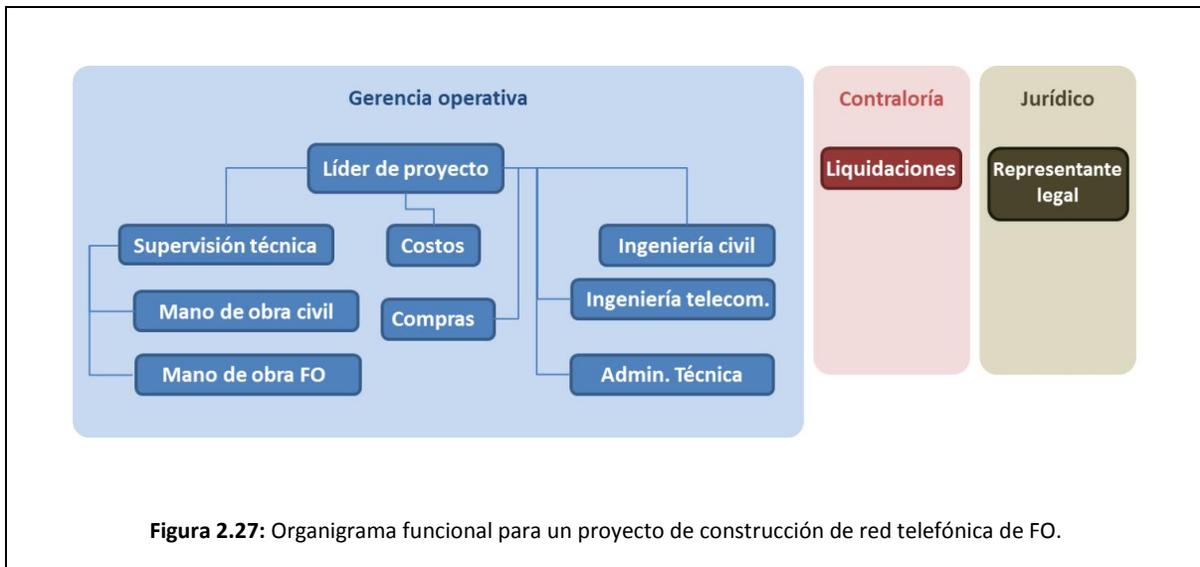
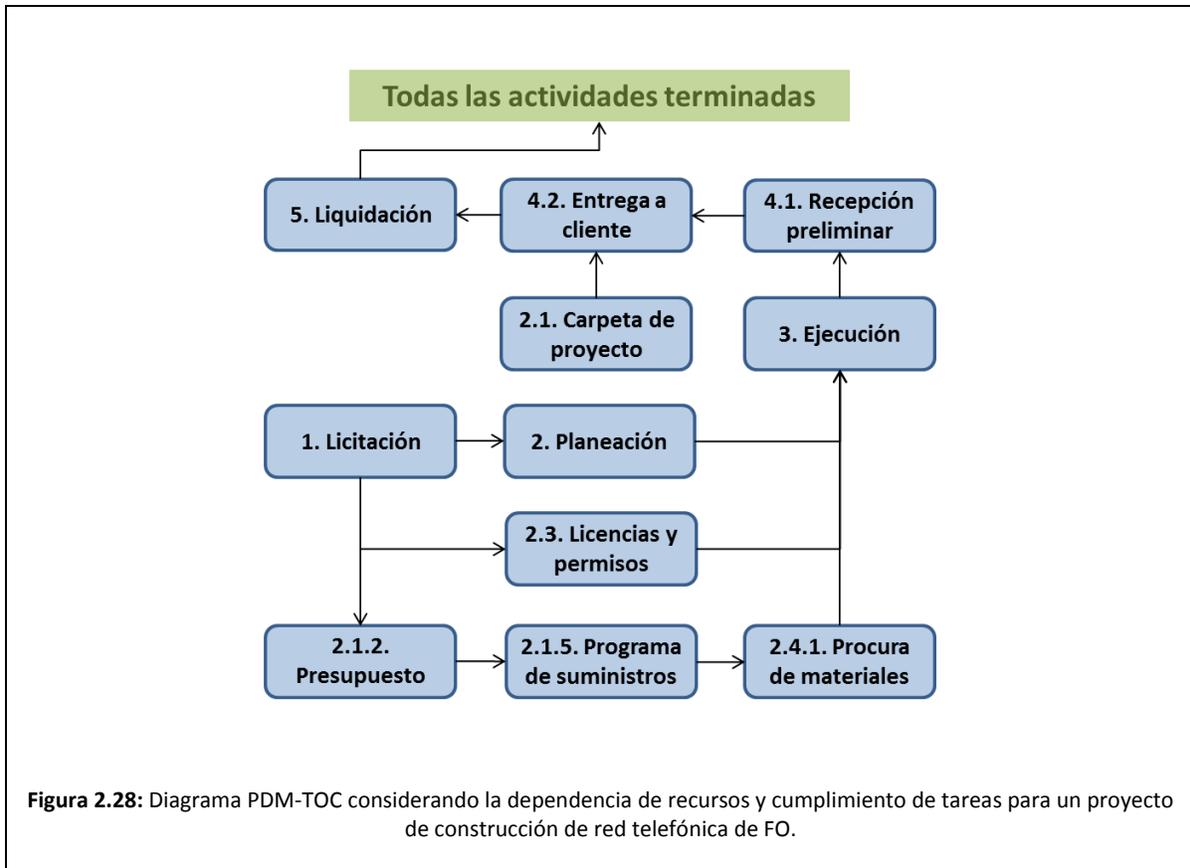


Figura 2.27: Organigrama funcional para un proyecto de construcción de red telefónica de FO.

En el caso del representante legal, éste sólo participa en la actividad 2.3 *Licencias y permisos* pero no en las otras tres actividades del paquete de tareas 2 *Planeación*, debido a esto también se deberá aislar para ser considerada como una cadena secundaria del proyecto. Un caso similar sucede con la actividad 2.1.2 *Presupuesto* en la cual sólo interviene el área de costos. Por este motivo se deberá considerar también como una cadena secundaria. La actividad 2.4 *Procura de recursos* es una actividad en la que interviene sólo el encargado de compras, de manera que también la consideraremos como una cadena secundaria. En la Figura 2.28 se muestra el diagrama PDM-TOC considerando dependencia de recursos y de cumplimiento de tareas.



Una vez identificadas y secuenciadas, las tareas críticas se colocan en un cronograma de actividades que se puede observar en la Figura 2.29. Las actividades en color rojo representan las tareas críticas, mientras que en azul se observan las tareas secundarias. Siguiendo con la metodología TOC, es necesario minimizar o eliminar la Ley de Parkinson y el síndrome del estudiante. Para lograr lo anterior reduciremos lo más posible la duración de todas las tareas considerando el 100% de disponibilidad de recursos y estimaciones críticas a cada una de ellas. Así, sólo se contemplará el tiempo justo de ejecución del proyecto, se agregarán buffers de alimentación en cada cadena secundaria y el buffer de tiempo del proyecto al final del mismo. La duración de la cadena crítica sumada al buffer de proyecto debe cubrir el mismo plazo de proyecto que en el esquema tradicional. Para este proceso es necesario realizar las iteraciones que sean necesarias de los 5 puntos de TOC.

En la Figura 2.30 se muestra el cronograma aplicando la metodología TOC, se puede observar que la duración de todas las tareas es menor y que se ha agregado el buffer de proyecto al final de la cadena crítica. En cada cadena secundaria se observa un buffer de alimentación antes de su intersección con la cadena crítica de manera que éstas comiencen con el tiempo necesario para su ejecución, ni antes ni después, a pesar de que podrían empezar antes. En el capítulo 3 se ejemplificará a detalle la metodología con un caso de uso.

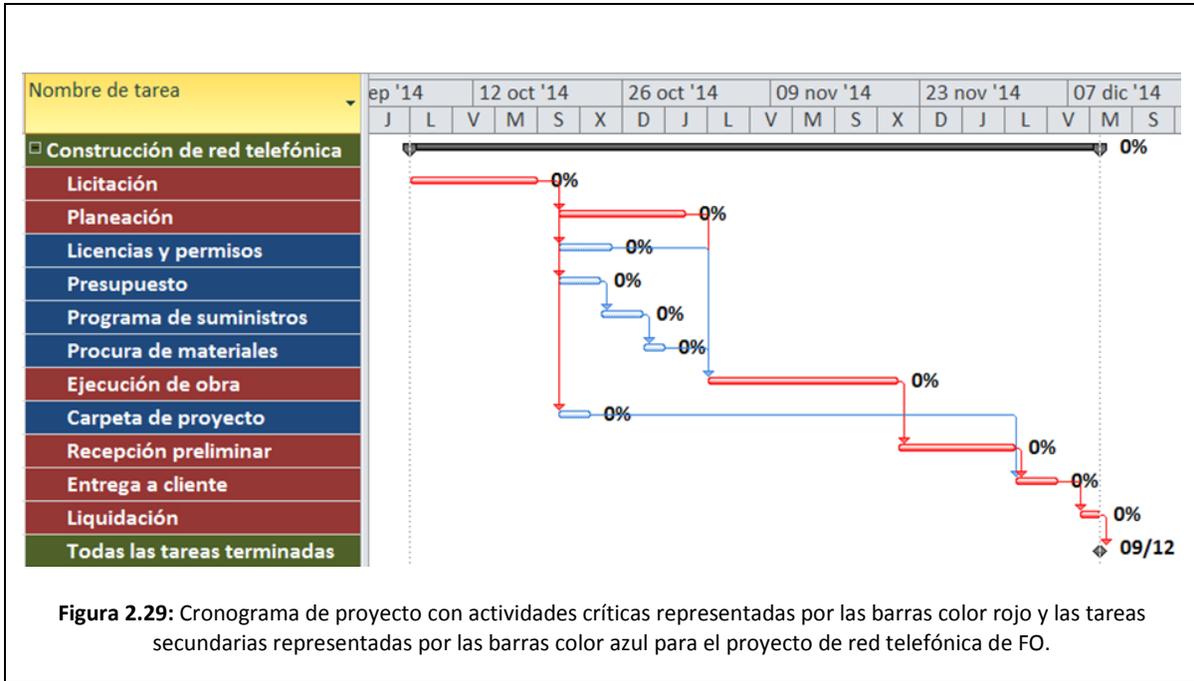


Figura 2.29: Cronograma de proyecto con actividades críticas representadas por las barras color rojo y las tareas secundarias representadas por las barras color azul para el proyecto de red telefónica de FO.

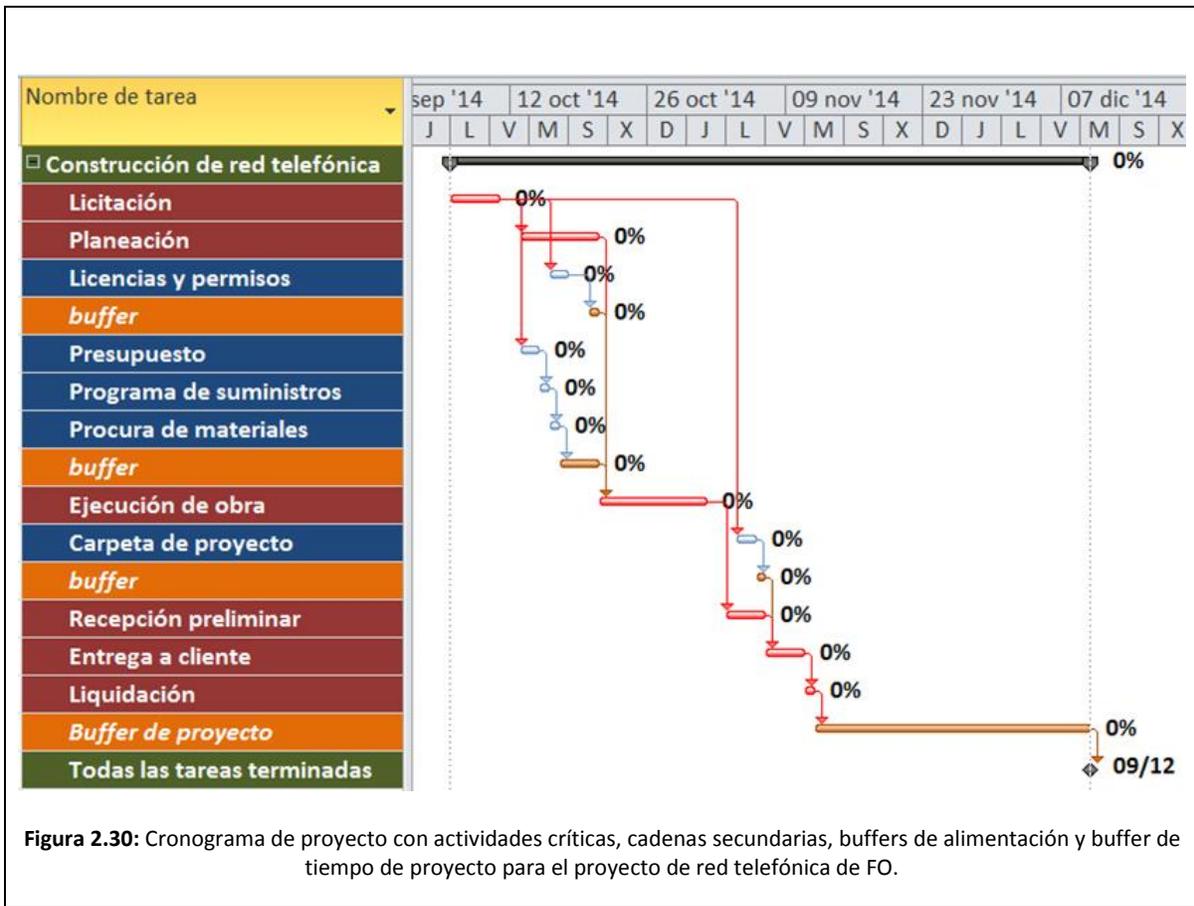


Figura 2.30: Cronograma de proyecto con actividades críticas, cadenas secundarias, buffers de alimentación y buffer de tiempo de proyecto para el proyecto de red telefónica de FO.

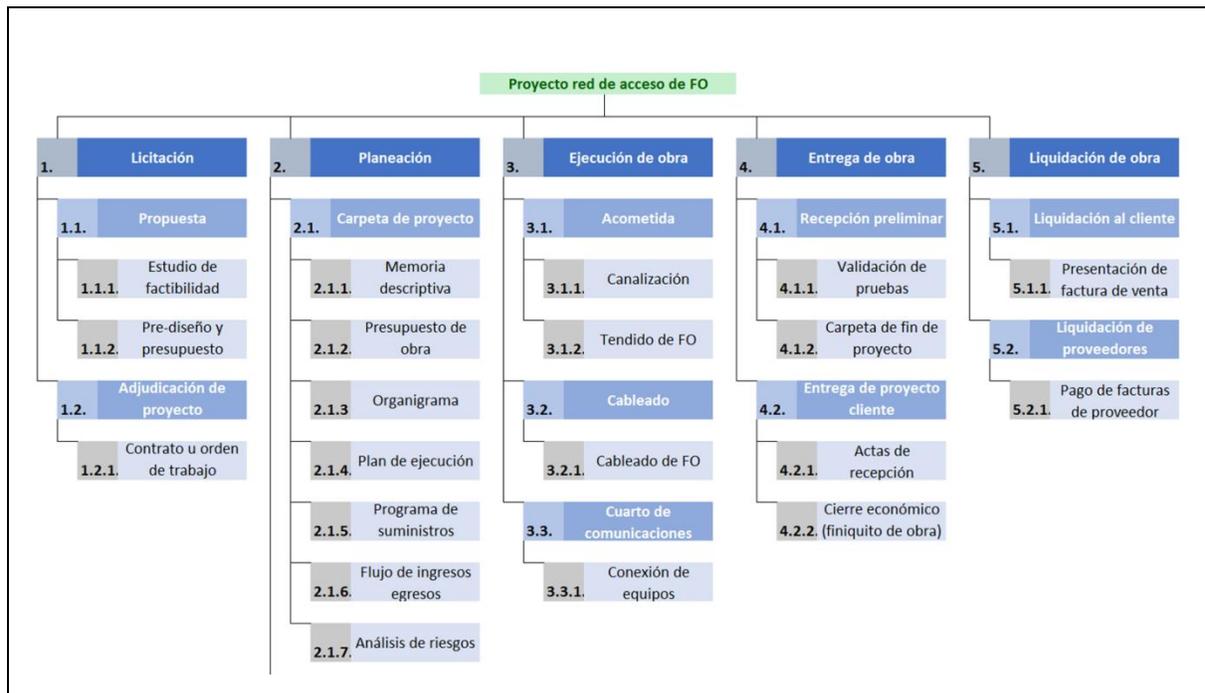
2.3.2 Construcción de red de acceso.

Para la construcción de redes de acceso de fibra óptica se consideran actividades similares a las del proyecto de red telefónica con diferencia en la ejecución de obras, ya que la topología de una red de acceso requiere de un cableado diferente, una acometida y un cuarto de comunicaciones lo que se traduce en costos y tiempos de ejecución diferentes.

El alcance para un proyecto de red de acceso de FO debe contemplar lo siguiente:

- Plazo de duración del proyecto.
- Presupuesto.
- Permisos y licencias (de ser requerido).
- Número de casas pasadas o nodos de interconexión.
- Parámetros de la red.
- Cuarto de comunicaciones y conexión de equipos.
- Acometida de FO.
- Mediciones y pruebas.
- Documentación requerida para la entrega.
- Liquidación del proyecto.

La Figura 2.31 muestra la EDT de un proyecto de red de acceso de fibra óptica, donde se pueden apreciar los paquetes de trabajo y sus respectivas actividades a nivel 1 y 2.



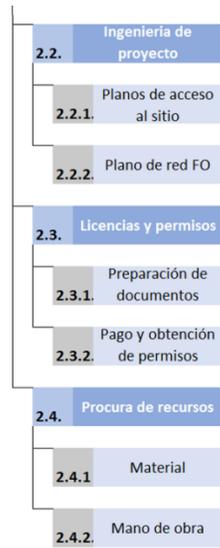


Figura 2.31: EDT de un proyecto de construcción de red de acceso de fibra óptica.

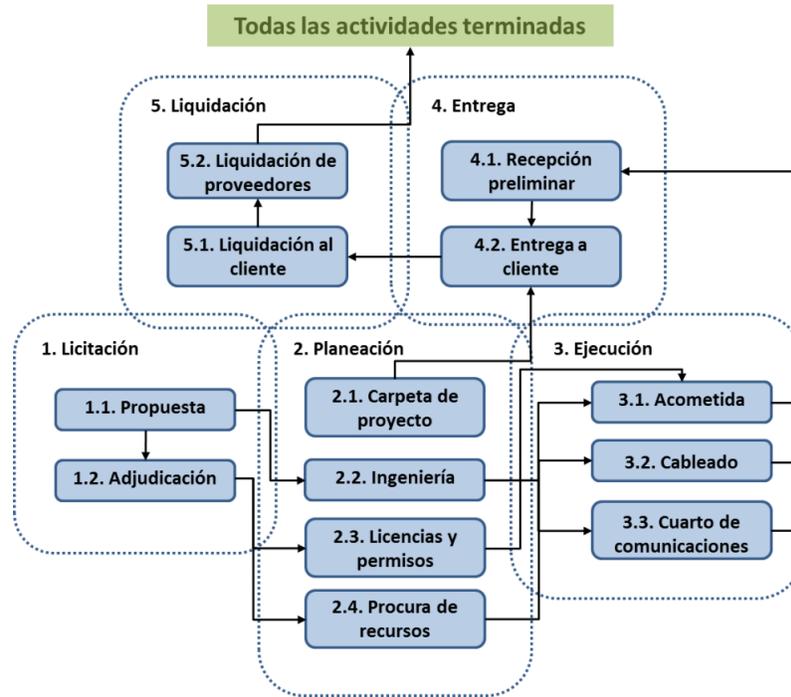
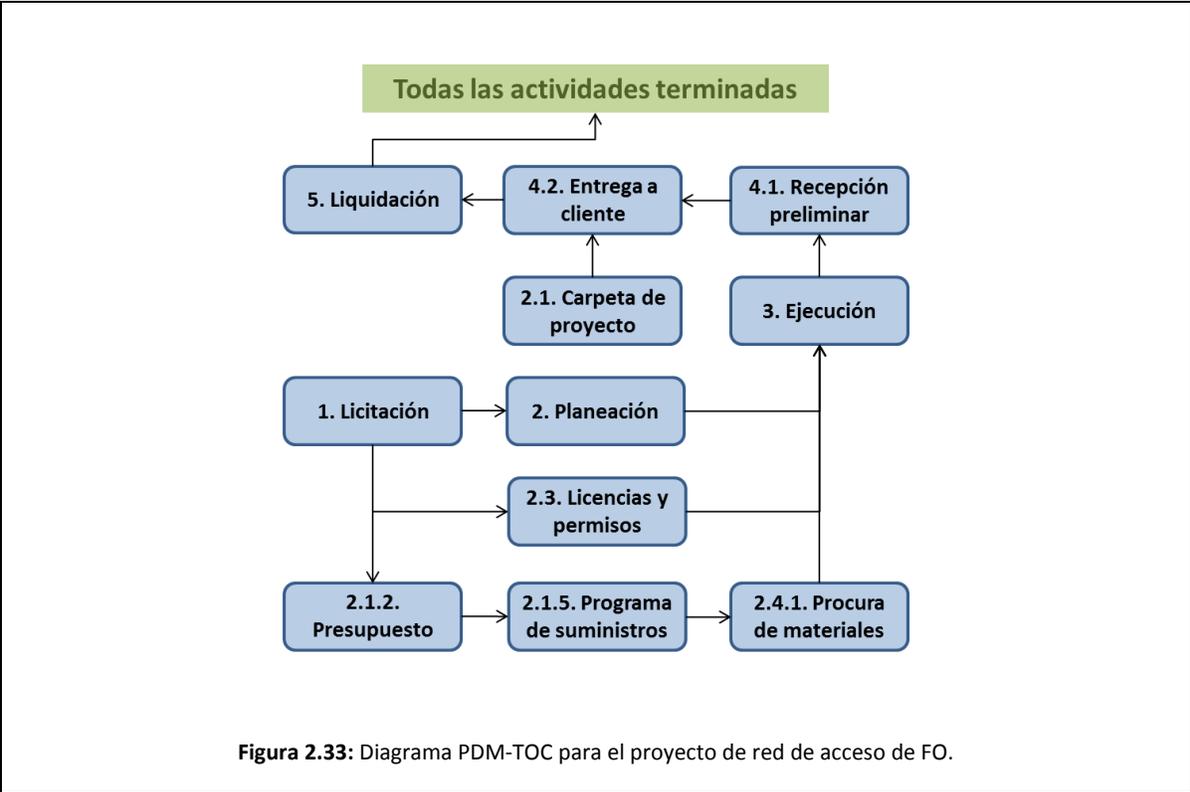


Figura 2.32: Diagrama PDM para el proyecto de red de acceso de FO.

Las Figuras 2.32 y 2.33 muestran el diagrama PDM de las actividades del proyecto a nivel 1 y el diagrama PDM-TOC de las actividades críticas y secundarias del proyecto respectivamente. De forma similar a como se realizó el análisis para el proyecto de red telefónica, es necesario considerar tanto las dependencias de cumplimiento de tareas como la dependencia de recursos. Para dicho propósito consideraremos el mismo organigrama funcional de proyecto que se muestra en la Figura 2.27. En este caso las actividades críticas y secundarias del proyecto de red de acceso son las mismas que en el proyecto de red telefónica.



Las tareas críticas identificadas en el diagrama PDM-TOC se colocan en un cronograma de proyecto junto con las actividades secundarias. La Figura 2.34 muestra el cronograma de proyecto de una red de acceso de fibra óptica en el cual se identifican en rojo las tareas críticas y en azul las tareas secundarias.

Finalmente al aplicar la metodología TOC se ajusta el tiempo de cada actividad, se incluyen los buffers de alimentación a las cadenas secundarias y se incluye el buffer de proyecto al final del mismo. La Figura 2.35 muestra el cronograma aplicando la metodología TOC. En el capítulo 3 se ejemplificará a detalle la metodología con un caso de uso para la construcción de una red de acceso de fibra óptica.

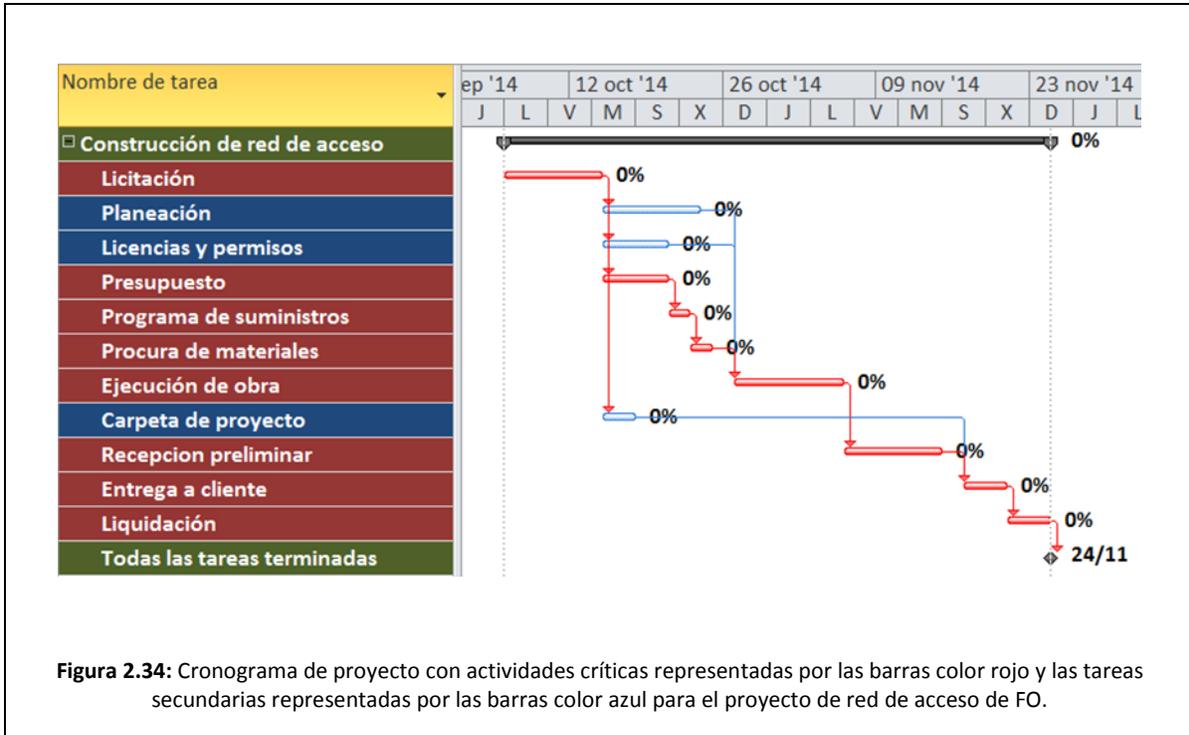


Figura 2.34: Cronograma de proyecto con actividades críticas representadas por las barras color rojo y las tareas secundarias representadas por las barras color azul para el proyecto de red de acceso de FO.

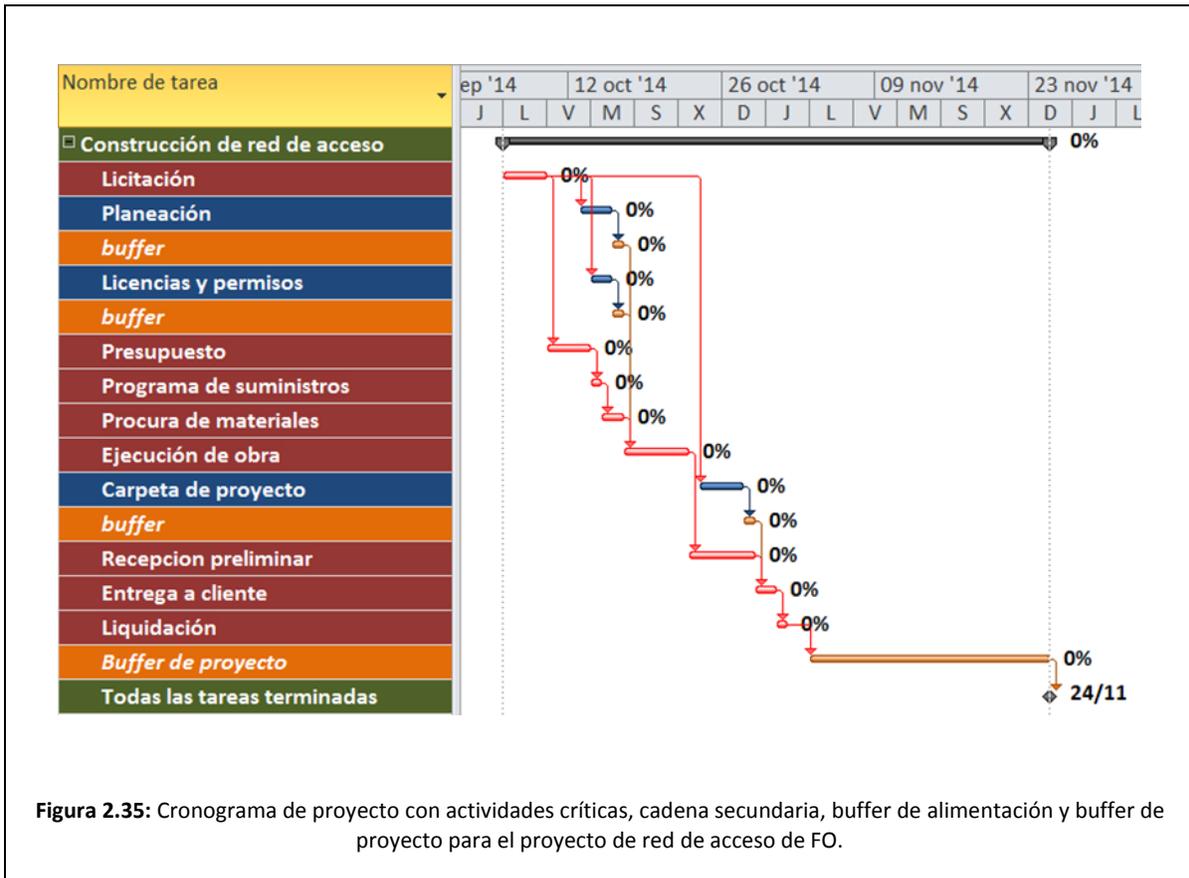


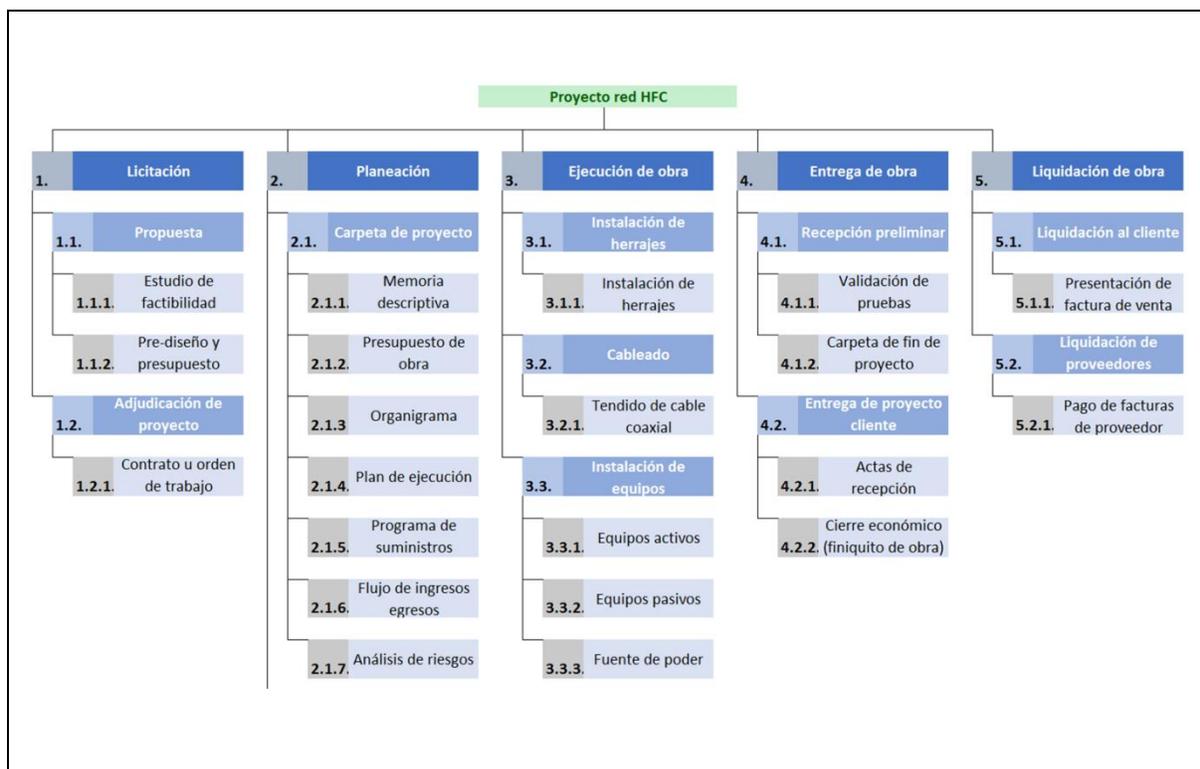
Figura 2.35: Cronograma de proyecto con actividades críticas, cadena secundaria, buffer de alimentación y buffer de proyecto para el proyecto de red de acceso de FO.

2.3.3 Construcción de red HFC.

La construcción de una red HFC contempla una sección de fibra óptica y otra de cable coaxial. En un nodo HFC se tiene una red de acceso y una red de distribución, ambas de cable coaxial. Consideraremos un nodo HFC a partir del convertidor óptico-electrónico y hasta los TAPS. El alcance que se debe considerar para el proyecto de red HFC contempla lo siguiente:

- Plazo de duración del proyecto.
- Presupuesto.
- Permisos y licencias (de ser requerido).
- Número de casas pasadas.
- Capacidad de la red
- Instalación de herrajes.
- Instalación de equipos.
- Mediciones y pruebas.
- Documentación requerida para la entrega.
- Liquidación del proyecto.

La Figura 2.36 muestra la EDT de un proyecto de red HFC donde se observan los paquetes de tareas y sus respectivas actividades a nivel 1 y 2.



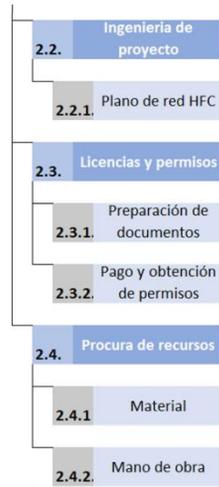


Figura 2.36: EDT de un proyecto de construcción de red HFC.

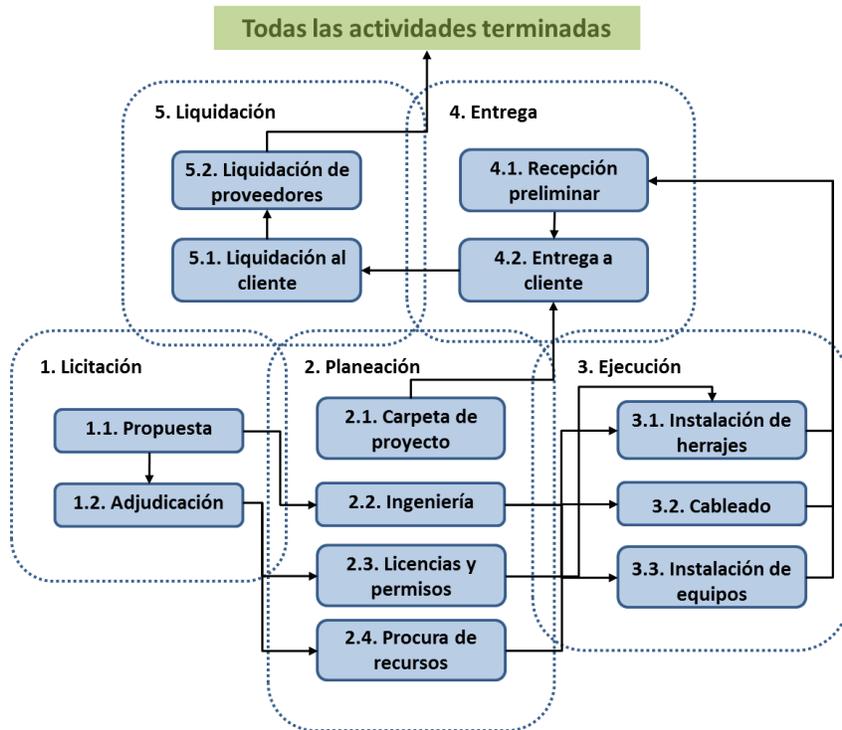
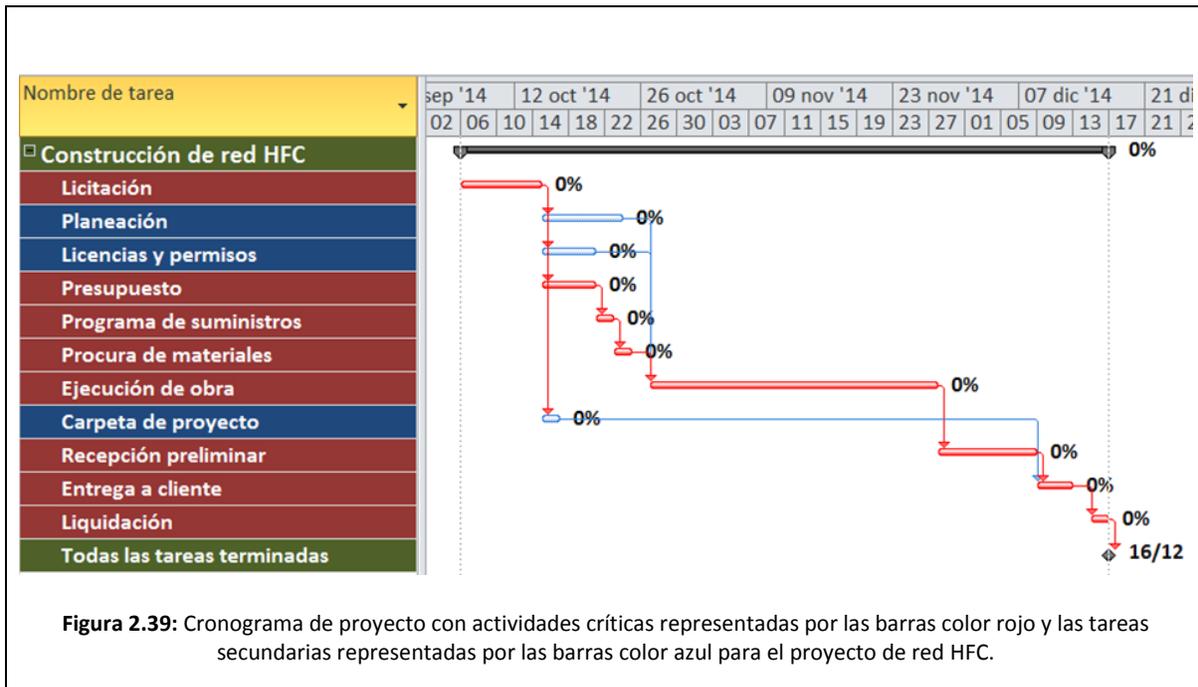
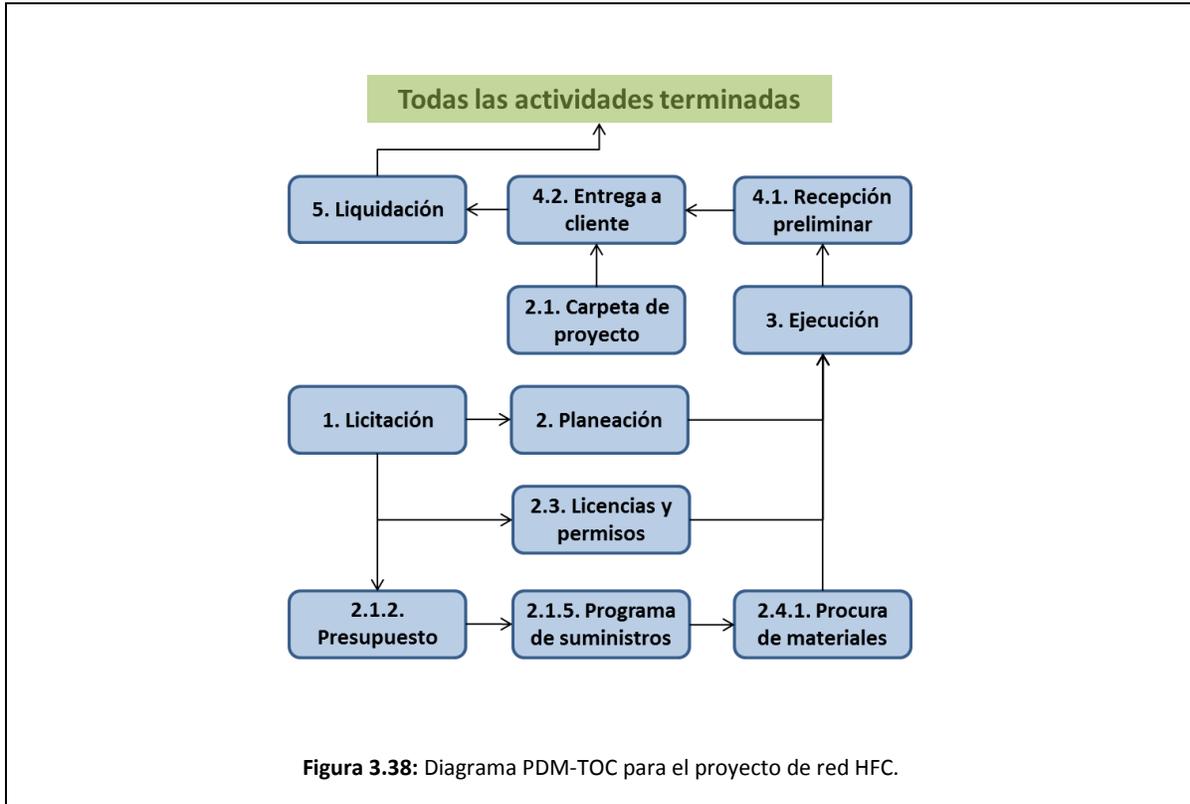


Figura 2.37: Diagrama PDM para el proyecto de red HFC.

La Figura 2.37 muestra el diagrama PDM de las actividades del proyecto a nivel 1. La Figura 2.38 muestra el diagrama PDM-TOC con las actividades críticas y actividades secundarias del proyecto.



El cronograma de actividades se muestra en la Figura 2.39, en él se observan las actividades críticas y las actividades secundarias del proyecto de red HFC. Al aplicar la metodología TOC se optimiza el tiempo de todas las actividades del proyecto, se consideran buffers de alimentación para las tareas secundarias y el buffer de tiempo de proyecto. La Figura 2.40 muestra el cronograma de actividades bajo la metodología TOC del proyecto de red HFC. En el capítulo 3 se ejemplificará a detalle la metodología con un caso de uso para la construcción de este tipo de proyectos.

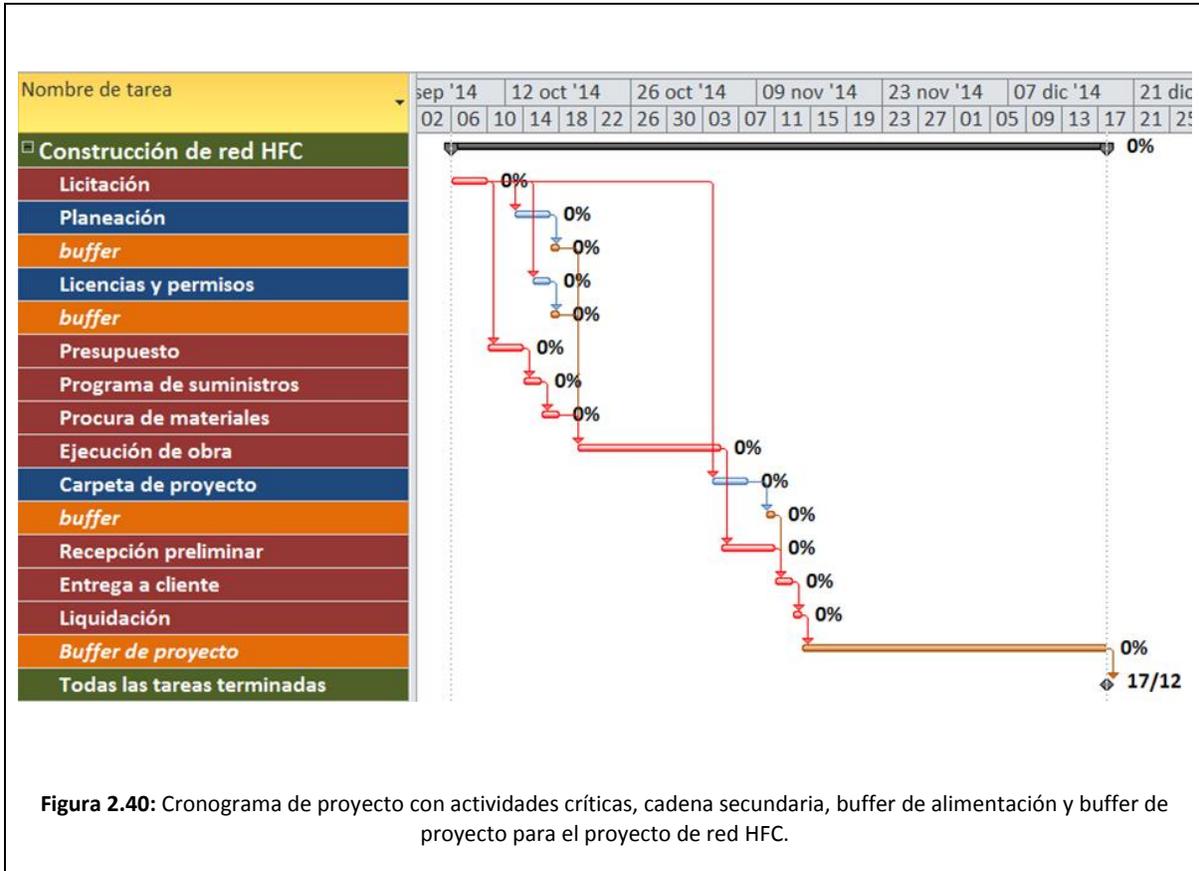


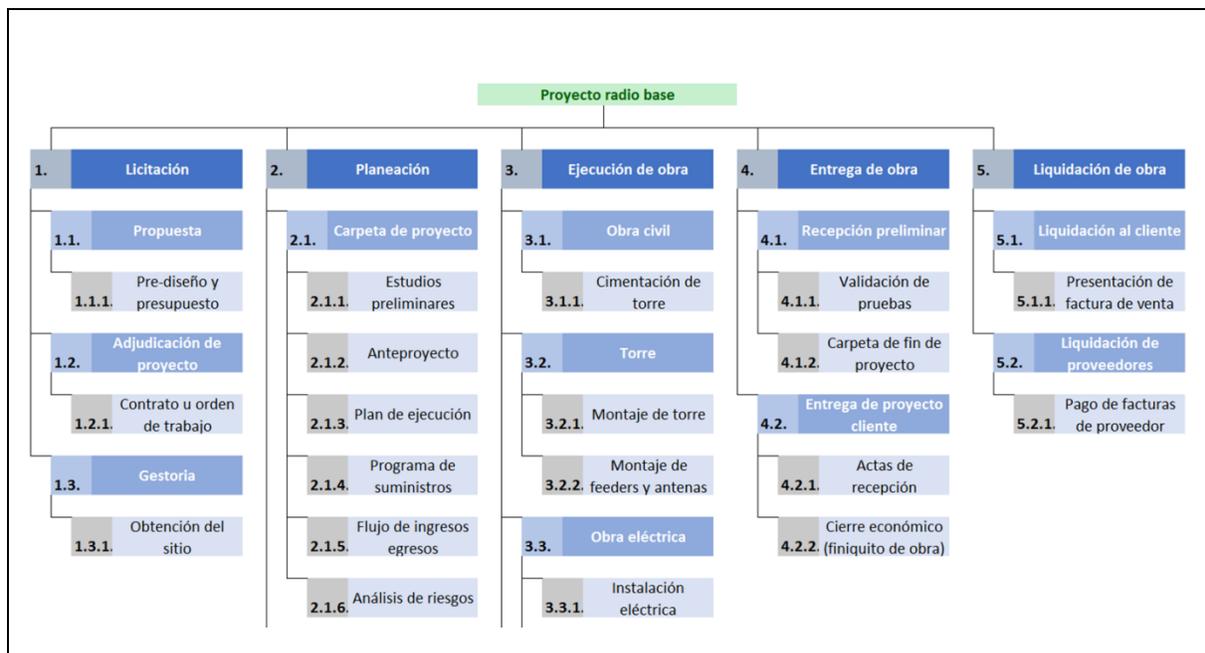
Figura 2.40: Cronograma de proyecto con actividades críticas, cadena secundaria, buffer de alimentación y buffer de proyecto para el proyecto de red HFC.

2.3.4 Construcción de radio base.

La construcción de una radio base es un poco diferente a las obras que se han visto en los puntos anteriores. En primer lugar porque no se trata de una red de comunicaciones, sino se trata de una estructura (la torre) cuya construcción es la principal actividad del proyecto. También se contempla su equipamiento, energización y conexión. El alcance de este tipo de proyectos debe considerar lo siguiente:

- Plazo de duración del proyecto.
- Presupuesto.
- Gestorías para la obtención del sitio.
- Permisos y licencias.
- Cimentación y montaje de la torre.
- Instalación eléctrica y sistema de tierras.
- Instalación de gabinete de comunicaciones.
- Instalación de antenas y equipos de radio transmisión.
- Mediciones y pruebas.
- Documentación requerida para la entrega.
- Liquidación del proyecto.

La Figura 2.41 muestra la EDT de un proyecto de construcción de una radio base. En ella se pueden observar los paquetes de tareas del proyecto, así como sus respectivas actividades a nivel 1 y 2.



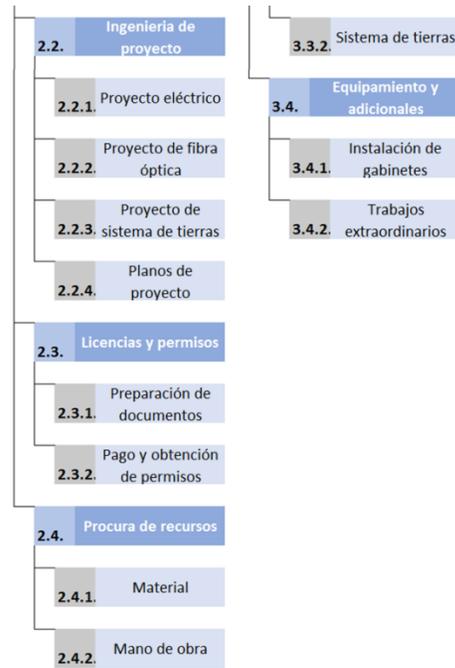


Figura 2.41: EDT de un proyecto de construcción de radio base.

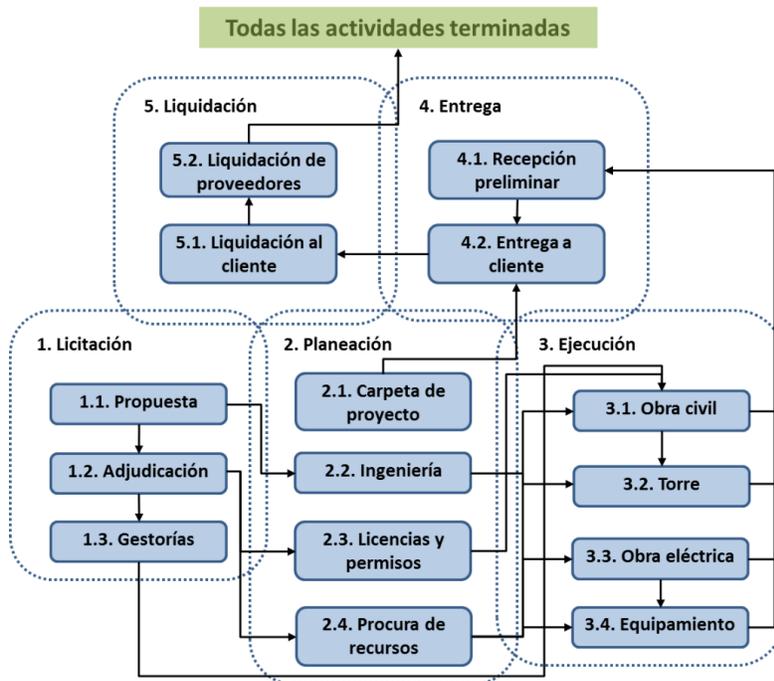


Figura 2.42: Diagrama PDM para el proyecto de construcción de radio base

La Figura 2.42 muestra el diagrama PDM de actividades a nivel 1 del proyecto de construcción de radio base. A diferencia de los diagramas PDM de los proyectos de red de comunicaciones, vemos que en el caso de la radio base es indispensable la actividad 1.3 *Gestorías* para iniciar con las actividades del paquete de tareas 3 *Ejecución de obra*. Esta actividad se lleva a cabo por un recurso que es destinado exclusivamente a esta actividad, ya que requiere de la búsqueda y obtención del sitio donde será construida la radio base. De esta manera el diagrama PDM-TOC con dependencia de cumplimiento de tareas y dependencia de recursos contempla la actividad 1.3 *Gestorías* como una cadena secundaria del proyecto. Es importante considerar que dependiendo de la duración de dicha tarea, ésta puede convertirse en tarea crítica ya en la práctica en determinados proyectos. La Figura 2.43 muestra el diagrama PDM-TOC del proyecto de construcción de una radio base.

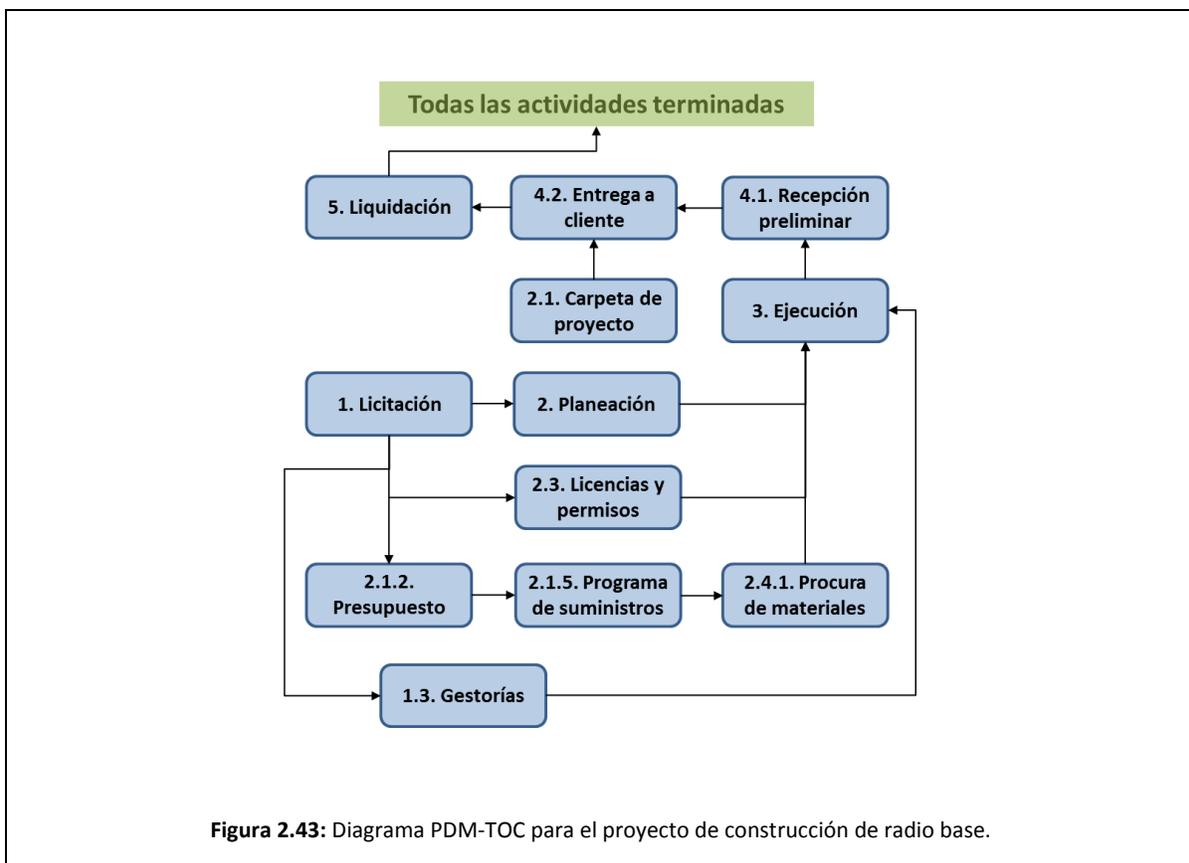


Figura 2.43: Diagrama PDM-TOC para el proyecto de construcción de radio base.

El cronograma de actividades se observa en la Figura 2.44, debido a que la actividad referente a gestorías no es de un plazo mayor a la planeación, se considera como una actividad secundaria. La Figura 2.45 muestra el cronograma aplicando la metodología TOC. Se observan las tareas críticas, así como las tareas secundarias, los buffers de alimentación para las cadenas secundarias y el buffer de tiempo de proyecto. En el capítulo 3 se ejemplificará a detalle la metodología con un caso de uso de un proyecto de construcción de radio base.

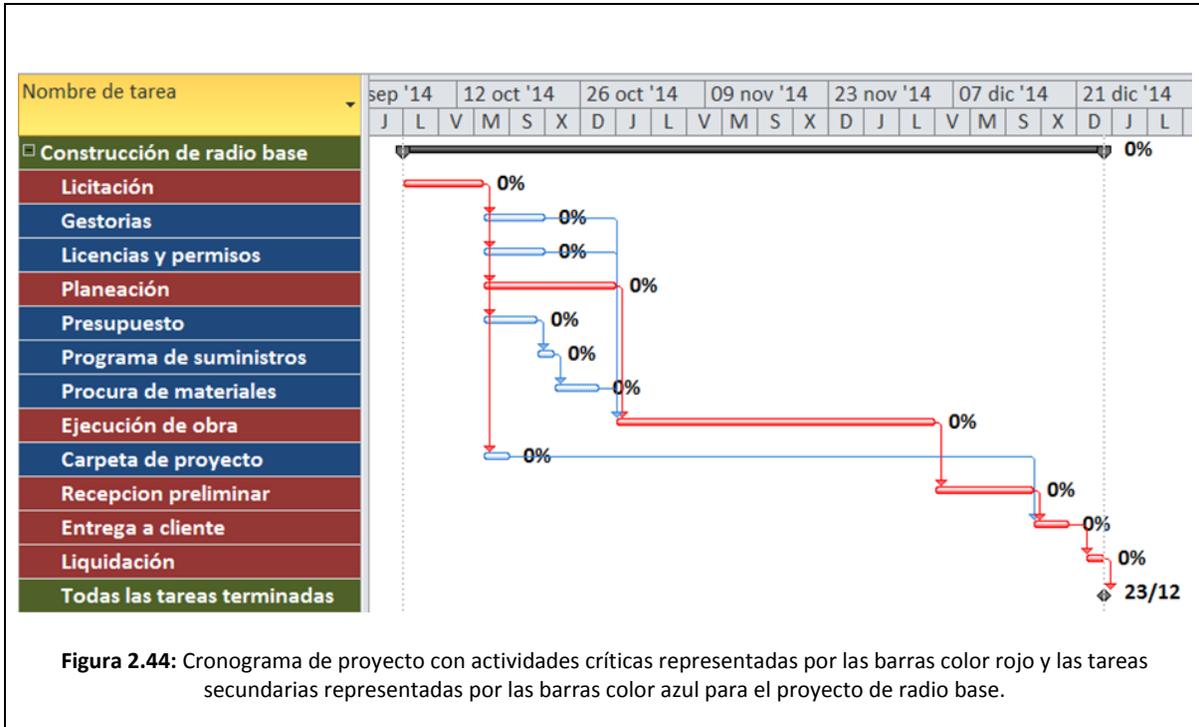


Figura 2.44: Cronograma de proyecto con actividades críticas representadas por las barras color rojo y las tareas secundarias representadas por las barras color azul para el proyecto de radio base.

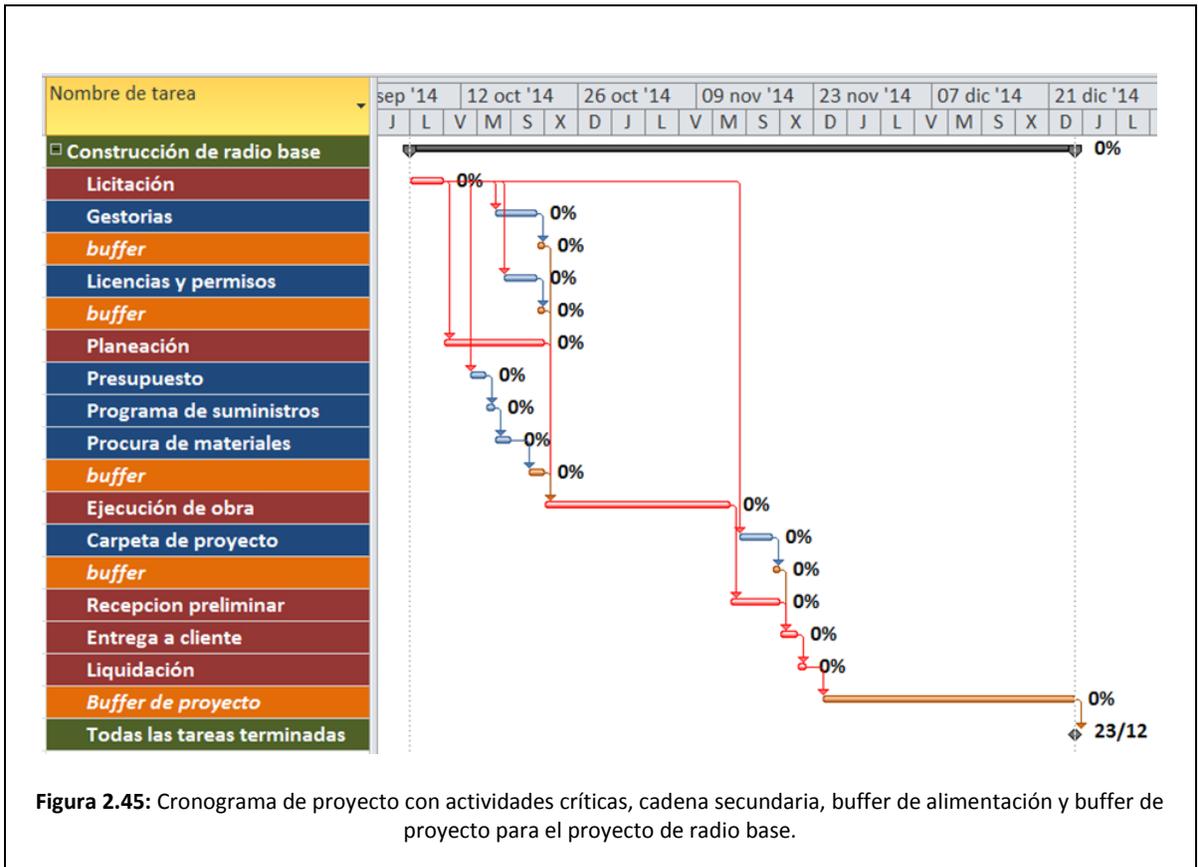


Figura 2.45: Cronograma de proyecto con actividades críticas, cadena secundaria, buffer de alimentación y buffer de proyecto para el proyecto de radio base.

Capítulo 3. Modelo de proyecto para obras de telecomunicaciones.

En este capítulo se modelan los cuatro tipos de proyectos para los cuales en el capítulo anterior se describió la metodología a seguir para su gestión. En cada punto se describen las diferencias entre una gestión de proyectos tradicional y la metodología que se propone en esta tesis basada en TOC. Al final se discuten los resultados obtenidos en las dos metodologías para cada proyecto.

3.1 Modelo y simulación de un proyecto de construcción en telecomunicaciones.

De acuerdo al desarrollo de la metodología vista en el Capítulo 2, la gestión de proyectos comprende todas las fases del proyecto de inicio a fin. Para el caso de los proyectos de red telefónica, red de acceso, red HFC y radio base, se tiene un proceso de licitación similar cuyo entregable es el contrato o la orden de trabajo liberada. Así mismo algunos puntos importantes (tareas críticas) comprenden actividades que difícilmente se pueden simular en este desarrollo pero que intervienen activamente en el proceso. En este sentido, todos los puntos que a continuación se exponen contemplan todas las tareas críticas del proyecto y algunas de las sub tareas implícitas se obviarán en el desarrollo, es el caso de actividades como la firma del contrato u orden de trabajo, los planos de ingeniería, la liberación de permisos municipales o licencias de construcción, etc. Todos los ejemplos aquí mostrados son ficticios y no corresponden a ningún proyecto en la vida real, sólo tienen la intención de ejemplificar de forma general la metodología propuesta en esta tesis.

3.1.1 Proyecto de construcción de red telefónica.

El escenario para el modelo de un proyecto de construcción de red telefónica es el siguiente:

Se requiere construir un enlace telefónico de fibra óptica de 10,000 [m] de longitud que interconecta dos centrales de una operadora telefónica. El enlace comprende una sección de área urbana y una sección de área rural, para lo cual el enlace tendrá 4,000 [m] de tendido aéreo y 6,000 [m] de fibra óptica subterránea. El enlace consta de 24 hilos de fibra óptica y operará en la banda de 1310 [nm]. El plazo para el proyecto es de 2 meses y medio, y se tiene un presupuesto de \$100,000.00.

De acuerdo al enunciado del planteamiento, el presupuesto es de \$100,000.00 y el plazo es de 10 semanas. El alcance del proyecto es el siguiente:

- Instalación e inmersión en ducto de 6000 [m] de cable óptico armado SMF de 24 hilos.
- Instalación y tendido aéreo de 4000 [m] cable óptico auto soportado SMF de 24 hilos.
- Obra civil de canalización e instalación de postes, cámaras de paso y cámaras de empalme.
- Empalmes por fusión de fibras ópticas.
- Mediciones de OTDR para nivel de certificación del enlace.
- Memoria técnica e informe final de trabajo realizado.
- Permisos y licencias de construcción.

Se utilizará un cable armado de fibra óptica SMF de 24 hilos que opere en la banda de 1310 [nm] para cubrir el tramo del enlace que debe ir canalizado (subterráneo) y se utilizará un cable auto soportado de fibra óptica SMF de 24 hilos que opere en la misma banda de 1310 [nm] para el tramo del enlace que debe ir aéreo. La Tabla 3.3 muestra las características de ambos cables.

Tabla 3.3: Características de los cables ópticos que se utilizarán en el proyecto de red telefónica.

Cable	Tipo de fibra	Atenuación [dB/km]	Diámetro de núcleo [μm]	Diámetro de revestimiento [μm]	Longitud de onda de operación λ [nm]	Apertura numérica NA	Longitud de tramo L [m]
Cable óptico armado	SMF	0.36	9.2 ± 0.4	125 ± 0.7	1310	0.14	2000
Cable auto soportado	SMF	0.36	9.2 ± 0.4	125 ± 0.7	1310	0.14	2000

Para comenzar con el presupuesto y el cronograma partimos de conocer los rendimientos para cada recurso, los cuales se expresan en la Tabla 3.4. Se pueden observar las tasas de costo para cada recurso y actividad y el costo total de los mismos. También se plantean los tiempos estimados de uso de cada recurso para las actividades del proyecto. Se considera el 100% de la disponibilidad de los recursos.

Tabla 3.4: Rendimientos, duración y costo de recursos correspondientes al costo directo del proyecto de red telefónica de FO.

Recurso	Trabajo	Rendimiento	Tasa de costo	Tiempo estimado	Costo
Ingeniería telecom.	Proyecto de FO	Por proyecto	-	4 días	\$2,500.00
Ingeniería civil	Proyecto civil	Por proyecto	-	2 días	\$1,200.00
Representante legal	Pago y obtención de permisos	Por proyecto	-	2 días	\$1,800.00
Supervisor de obra civil	Supervisión de obra	Por proyecto	-	13 días	\$3,600.00
Supervisor de fibra óptica	Supervisión de obra	Por proyecto	-	7 días	\$1,550.00
Supervisor de fibra óptica	Validación de pruebas	Por proyecto	-	2 días	\$1,000.00
Cuadrilla de fibra óptica	Inmersión de FO subterránea	2000 [m/día]	\$180.00/hora	3 días	\$4,320.00
Cuadrilla de fibra óptica	Tendido aéreo de FO	1000 [m/día]	\$180.00/hora	5 días	\$7,200.00
Cuadrilla de fibra óptica	Empalmes por fusión	2 [u/día]	\$180.00/hora	1 día	\$1,440.00
Cuadrilla de obra civil	Canalización	600 [m/día]	\$180.00/hora	10 días	\$14,400.00
Cuadrilla de obra civil	Instalación de postes	2 [u/día]	\$180.00/hora	8 días	\$11,520.00
Cuadrilla de obra civil	Construcción de cámaras	2 [u/día]	\$180.00/hora	3 días	\$4,320.00
Materiales	Suministro de materiales	Por proyecto	-	3 días	\$27,000.00

Costo directo estimado: \$81, 850. 00

La tabla muestra sólo los costos por recurso que corresponden al costo directo del proyecto, esto es la mano de obra directa y los materiales, así como gastos directos como lo son el pago de permisos y planos de ingeniería.

La estimación de costo indirecto se calcula a partir del costo directo total del proyecto. Comúnmente se estima un 8% del costo directo. Los costos indirectos corresponden a los gastos técnicos administrativos del proyecto, es decir, los honorarios del líder de proyecto, personal de costos, administración técnica y personal de compras. Cabe resaltar que se plantea el escenario de una empresa cuyo personal atiende a varios proyectos simultáneos, por lo que el cálculo de indirectos de este proyecto específico aporta una parte del sueldo de los recursos en cuestión.

El valor de costo directo más costo indirecto del proyecto se calcula como:

$$CI = CD * 0.08 = \$6,548.00$$

$$CD + CI = \$88,398.00$$

Dónde:

CI: Costo indirecto.

CD: Costo directo.

Al importe calculado se debe agregar un porcentaje de utilidad para conformar el precio final de venta. Dentro de la utilidad comúnmente se calcula un 4% para oficina central, dentro del cual se considera el costo de los servicios de apoyo como lo son el representante legal y el personal de contraloría. Dentro de la utilidad también se considera el 6% de utilidad neta, el cual es el valor agregado para la empresa. El precio de venta final se calcula como:

$$U = (CD + CI) * 0.10$$

$$PV = CD + CI + U$$

$$PV = CD * 1.188 = \$97,237.80$$

Dónde:

U: Utilidad.

PV: Precio de venta.

El presupuesto de proyecto a costo directo integrando todas las tareas y recursos se muestra en la Figura 3.46. Se puede observar la duración del proyecto y el costo directo de cada actividad. También se observa el plazo de ejecución de inicio a término de proyecto. La Figura 3.47 muestra el cronograma de proyecto.

Nombre de tarea	Nombres de los recursos	Duración	Costo
Construcción de red telefónica		47 días	\$81,850.00
- Licitación		10 días	\$0.00
- Propuesta		8 días	\$0.00
Estudio de factibilidad	Admin. Técnica	3 días	\$0.00
Prediseño y presupuesto	Líder de proyecto, Admin. Técnica	5 días	\$0.00
- Adjudicación		2 días	\$0.00
Contrato u orden de trabajo	Líder de proyecto	2 días	\$0.00
- Planeación		10 días	\$5,500.00
- Carpeta de proyecto		10 días	\$0.00
Memoria descriptiva	Admin. Técnica	2 días	\$0.00
Presupuesto de obra	Costos	4 días	\$0.00
Organigrama	Líder de proyecto	1 día	\$0.00
Análisis de riesgos	Líder de proyecto	1 día	\$0.00
Plan de ejecución	Líder de proyecto	3 días	\$0.00
Programa de suministros	Líder de proyecto	2 días	\$0.00
Flujo de ingresos y egresos	Líder de proyecto	3 días	\$0.00
- Ingeniería		4 días	\$3,700.00
Proyecto de obra civil	Ingeniería civil	2 días	\$1,200.00
Proyecto de fibra óptica	Ingeniería telecom	4 días	\$2,500.00
- Licencias y permisos		5 días	\$1,800.00
Preparación de documentos	Legal	3 días	\$0.00
Pago y obtención de permisos	Legal	2 días	\$1,800.00
Procura de materiales	Compras	3 días	\$27,000.00
- Ejecución de obra		14 días	\$48,350.00
- Obra civil		13 días	\$33,840.00
Supervisión de obra	Supervisor	13 días	\$3,600.00
Canalización	Obra civil cuadrilla 1	10 días	\$14,400.00
Construcción de cámaras	Obra civil cuadrilla 1	3 días	\$4,320.00
Instalación de postes	Obra civil cuadrilla 2	8 días	\$11,520.00
- Tendido de FO		7 días	\$14,510.00
Supervisión de obra	Supervisor	7 días	\$1,550.00
Inmersión de FO	FO cuadrilla 1	3 días	\$4,320.00
Tendido de FO	FO cuadrilla 2	5 días	\$7,200.00
Empalmes por fusión	FO cuadrilla 1	1 día	\$1,440.00
- Entrega		11 días	\$1,000.00
- Recepción preliminar		7 días	\$1,000.00
Validación de pruebas	Supervisor	2 días	\$1,000.00
Carpeta de fin de proyecto	Líder de proyecto, Admin. Técnica	5 días	\$0.00
- Entrega a cliente		4 días	\$0.00
Actas de recepción	Líder de proyecto	2 días	\$0.00
Finiquito de obra	Líder de proyecto	2 días	\$0.00
- Liquidación		2 días	\$0.00
- Liquidación a cliente		1 día	\$0.00
Presentación de factura de venta	Liquidaciones	1 día	\$0.00
- Liquidación de proveedores		1 día	\$0.00
Pago de facturas de proveedor	Liquidaciones	1 día	\$0.00
Todas las tareas terminadas	Líder de proyecto	0 días	\$0.00

Figura 3.46: Presupuesto a costo directo integrando duración de tareas y recursos para el proyecto de red telefónica de fibra óptica.

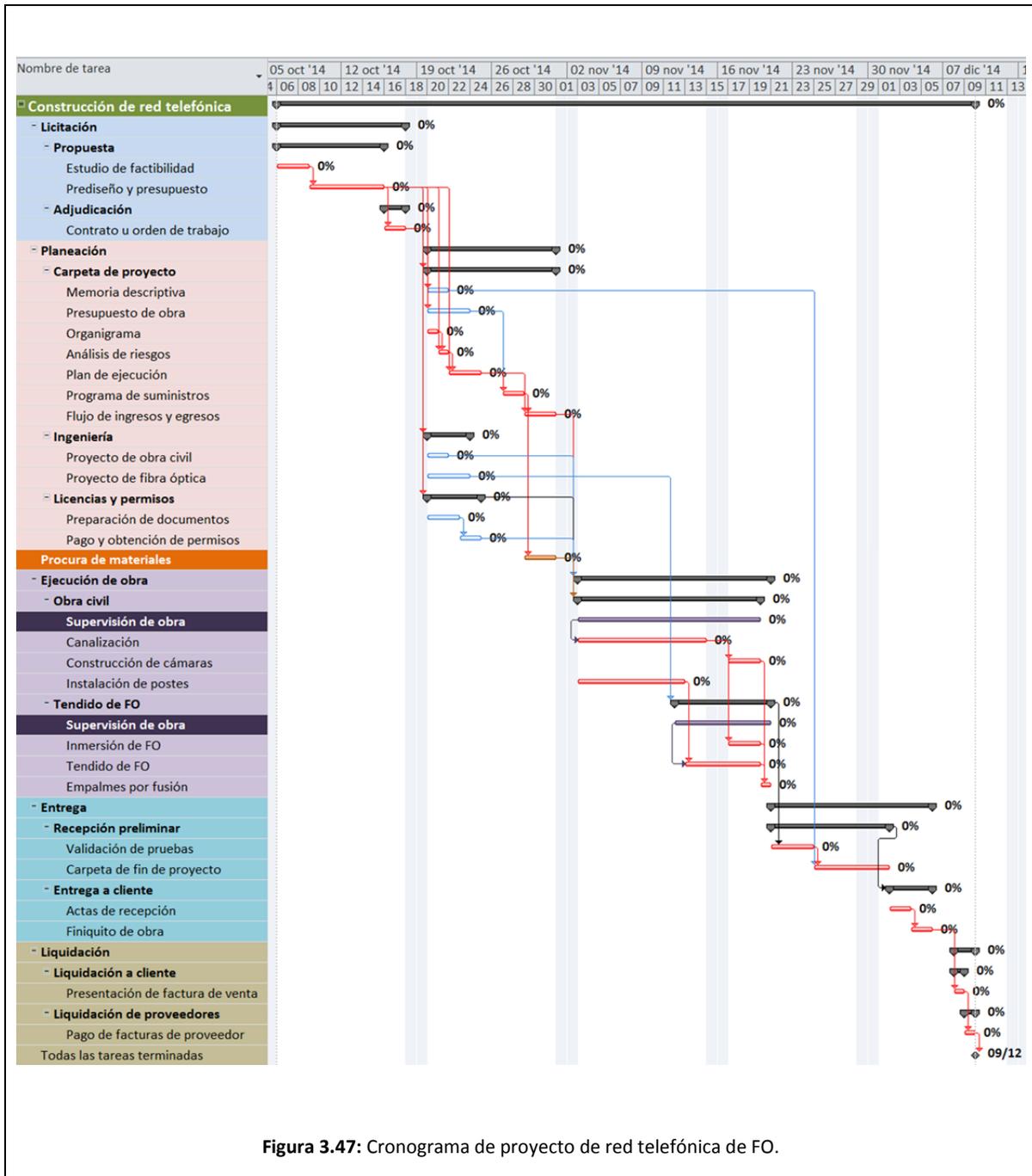


Figura 3.47: Cronograma de proyecto de red telefónica de FO.

Hasta este punto una gestión de proyectos tradicional sería aceptable debido a que la duración estimada del proyecto cumple con el requerimiento de plazo. De las 10 semanas en las que se requiere la culminación de proyecto, se planificaron 9 semanas y dos días, teniendo un margen de tres días para su cumplimiento, además de considerar que cada actividad fue calculada con un margen de protección de forma individual. El presupuesto también cumple con el requerimiento ya que se estima un valor de venta de \$97,237.80 lo que es \$2,762.20 por debajo del presupuesto requerido (\$100,000.00).

Ahora aplicaremos la metodología TOC. El presupuesto y cronograma se reducen a lo mostrado en las Figuras 3.48 y 3.49 respectivamente.

Nombre de tarea	Duración	Costo
<input type="checkbox"/> Construcción de red telefónica	50 días	\$64,570.00
Licitación	5 días	\$0.00
Planeación	6 días	\$3,700.00
Licencias y permisos	2 días	\$1,800.00
<i>buffer</i>	1 día	\$0.00
Presupuesto	2 días	\$0.00
Programa de suministros	1 día	\$0.00
Procura de materiales	1 día	\$27,000.00
<i>buffer</i>	2 días	\$0.00
<input type="checkbox"/> Ejecución de obra	9 días	\$31,070.00
<input type="checkbox"/> Obra civil	8 días	\$20,880.00
Supervisión de obra	8 días	\$3,600.00
Canalización	6 días	\$8,640.00
Construcción de cámaras	2 días	\$2,880.00
Instalación de postes	4 días	\$5,760.00
<input type="checkbox"/> Tendido de FO	7 días	\$10,190.00
Supervisión de obra	7 días	\$1,550.00
Inmersión de FO	2 días	\$2,880.00
Tendido de FO	3 días	\$4,320.00
Empalmes por fusión	1 día	\$1,440.00
Carpeta de proyecto	2 días	\$0.00
<i>buffer</i>	1 día	\$0.00
Recepción preliminar	4 días	\$1,000.00
Entrega a cliente	2 días	\$0.00
Liquidación	1 día	\$0.00
<i>Buffer de proyecto</i>	23 días	\$0.00
Todas las tareas terminadas	0 días	\$0.00

Figura 3.48: Presupuesto a costo directo y duración de tareas aplicando la metodología TOC para el proyecto de red telefónica de FO.

Se puede observar que a diferencia del presupuesto y cronograma en una gestión de proyectos tradicional, cuando se aplica la metodología TOC el proyecto tiene una duración real y un costo directo significativamente menores. El proyecto aplicando la metodología TOC permite tener un buffer de costo de proyecto de \$17,280.00 que corresponde al 21.11% del costo directo del proyecto. Así mismo se tiene un buffer de tiempo de proyecto de 4 semanas y 3 días, lo que corresponde al 46% del plazo del proyecto.

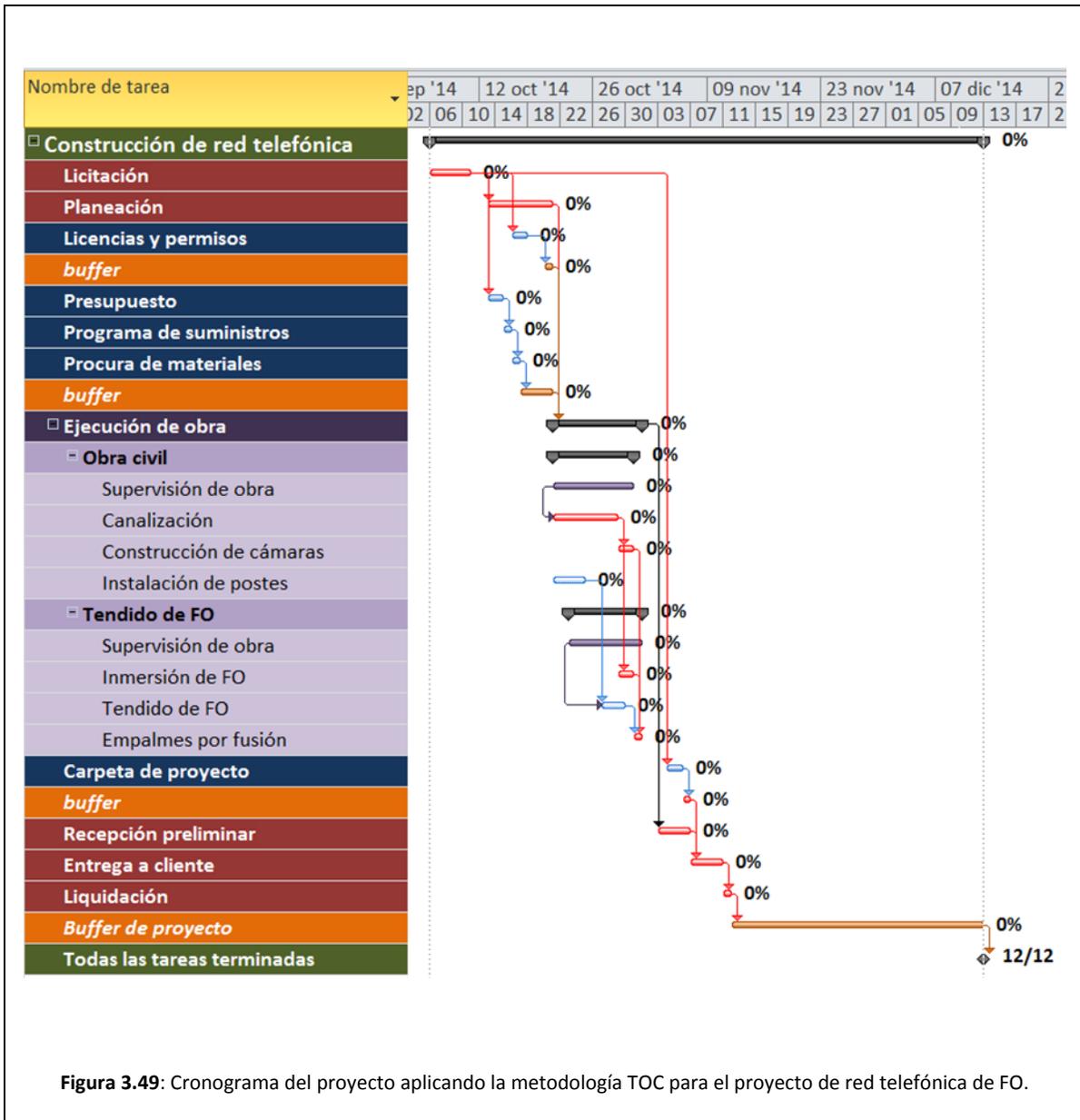


Figura 3.49: Cronograma del proyecto aplicando la metodología TOC para el proyecto de red telefónica de FO.

3.1.2 Proyecto de construcción de red de acceso.

El escenario para el modelo de un proyecto de construcción de red de acceso es el siguiente:

Se requiere construir una red acceso pasiva de fibra óptica (PON) para un hotel de 200 habitaciones. Se requiere realizar la instalación del cuarto de comunicaciones y el cableado a los 20 nodos. La red debe operar en la banda de 1310 [nm] con un ancho de banda de 500 [MHz]. El plazo es de 2 meses, y el presupuesto es de \$75,000.00.

De acuerdo al enunciado del planteamiento, el presupuesto es de \$75,000.00 y el plazo es de 8 semanas. El alcance del proyecto es el siguiente:

- Instalación e inmersión en ducto existente de 6,400 [m] de cable óptico Monotel MMF.
- Instalación y conexión de ODF (Optical Distribution Frame) en rack dentro del cuarto de comunicaciones.
- Acometida de fibra óptica desde la red pública hasta el cuarto de comunicaciones con cable óptico armado MMF.
- Empalmes por fusión de fibras ópticas.
- Conexión a los 20 nodos con terminal SC.
- Instalación de 20 routers.

Los rendimientos de los recursos, la duración de actividades y el costo asociado a las mismas se muestran en la Tabla 3.5.

Recurso	Trabajo	Rendimiento	Tasa de costo	Tiempo estimado	Costo
Ingeniería telecom	Planos de acceso al sitio	Por proyecto	-	2 días	\$1,000.00
Ingeniería telecom.	Proyecto de red de FO	Por proyecto	-	4 días	\$2,200.00
Cuadrilla de fibra óptica	Cuarto de comunicaciones	Por proyecto	\$180.00/hora	5 días	\$8,200.00
Cuadrilla de fibra óptica	Cableado de FO	800 [m/día]	\$180.00/hora	8 días	\$13,520.00
Cuadrilla de obra civil	Acometida	Por proyecto	-	3 días	\$4,820.00

Supervisión	Validación de pruebas	Por proyecto	-	2 días	\$1,000.00
Supervisión	Supervisión de obra	Por proyecto	-	16 días	\$3,500.00
Materiales	Suministro de materiales	Por proyecto	-	2 días	\$31,000.00
Costo directo estimado: \$61,740.00					

El costo directo del proyecto es de \$61,740.00. Si se considera un 8% de costos indirectos el costo de proyecto es:

$$CI = CD * 0.08 = \$4,939.2$$

$$CD + CI = \$66,679.20$$

Si se considera una utilidad de 10%, el precio de venta del proyecto es:

$$U = (CD + CI) * 0.10 = \$6,667.92$$

$$PV = CD * 1.188 = \$73,347.12$$

El presupuesto de proyecto a costo directo integrando todas las actividades y recursos se muestra en la Figura 3.50. Puede observarse el plazo del proyecto estimado que es de 7 semanas y un día. La Figura 3.51 muestra el cronograma de actividades del proyecto.

Nombre de tarea	Nombres de los recursos	Duración	Costo
Construcción de red de acceso		36 días	\$61,740.00
- Licitación		7 días	\$0.00
- Propuesta		5 días	\$0.00
Estudio de factibilidad	Admin. Técnica	2 días	\$0.00
Prediseño y presupuesto	Líder de proyecto, Admin. Técnica	3 días	\$0.00
- Adjudicación		2 días	\$0.00
Contrato u orden de trabajo	Líder de proyecto	2 días	\$0.00
- Planeación		7 días	\$3,200.00
- Carpeta de proyecto		7 días	\$0.00
Memoria descriptiva	Admin. Técnica	2 días	\$0.00
Presupuesto de obra	Costos	4 días	\$0.00

Organigrama	Líder de proyecto	1 día	\$0.00
Análisis de riesgos	Líder de proyecto	1 día	\$0.00
Plan de ejecución	Líder de proyecto	2 días	\$0.00
Programa de suministros	Líder de proyecto	2 días	\$0.00
Flujo de ingresos y egresos	Líder de proyecto	1 día	\$0.00
- Ingeniería		6 días	\$3,200.00
Planos de acceso al sitio	Ingeniería telecom	2 días	\$1,000.00
Planos de red de FO	Ingeniería telecom	4 días	\$2,200.00
- Licencias y permisos		4 días	\$0.00
Preparación de documentos	Legal	2 días	\$0.00
Pago y obtención de permisos	Legal	2 días	\$0.00
Procura de materiales	Compras	2 días	\$31,000.00
- Ejecución de obra		8 días	\$26,540.00
- Acometida		3 días	\$4,820.00
Supervisión de obra	Supervisor	3 días	\$500.00
Canalización	FO cuadrilla 1	2 días	\$2,880.00
Tendido de FO	FO cuadrilla 1	1 día	\$1,440.00
- Cableado		8 días	\$13,520.00
Supervisión de obra	Supervisor	8 días	\$2,000.00
Cablado de FO	FO cuadrilla 2	8 días	\$11,520.00
- Cuarto de comunicaciones		5 días	\$8,200.00
Supervisión de obra	Supervisor	5 días	\$1,000.00
Conexión de equipos	FO cuadrilla 1	5 días	\$7,200.00
- Entrega		11 días	\$1,000.00
- Recepción preliminar		7 días	\$1,000.00
Validación de pruebas	Supervisor	2 días	\$1,000.00
Carpeta de fin de proyecto	Líder de proyecto,Admin. Técnica	5 días	\$0.00
- Entrega a cliente		4 días	\$0.00
Actas de recepción	Líder de proyecto	2 días	\$0.00
Finiquito de obra	Líder de proyecto	2 días	\$0.00
- Liquidación		2 días	\$0.00
- Liquidación a cliente		1 día	\$0.00
Presentación de factura de venta	Liquidaciones	1 día	\$0.00
- Liquidación de proveedores		1 día	\$0.00
Pago de facturas de proveedor	Liquidaciones	1 día	\$0.00
Todas las tareas terminadas	Líder de proyecto	0 días	\$0.00

Figura 3.50: Presupuesto a costo directo integrando duración de tareas y recursos para el proyecto de red de acceso de fibra óptica.

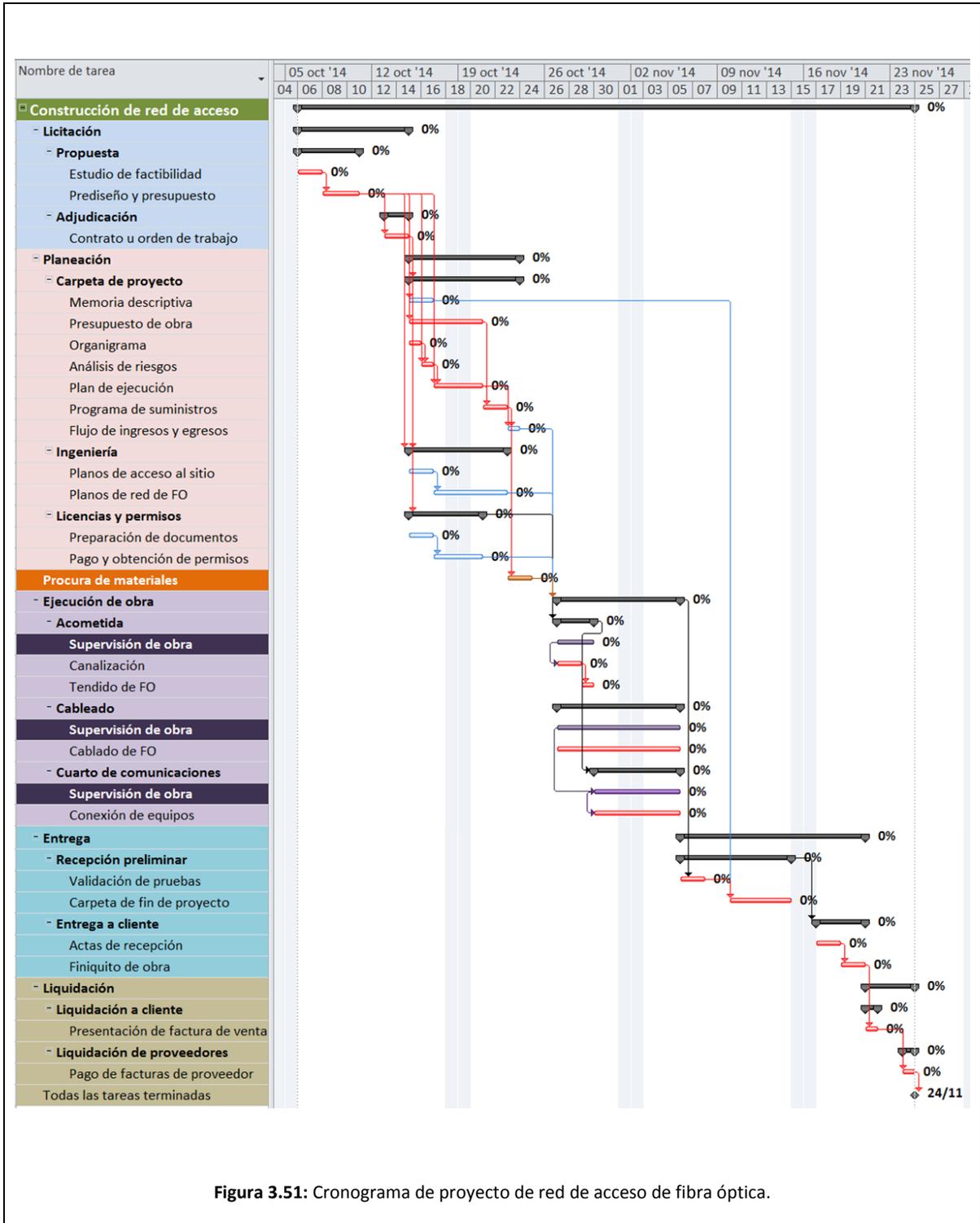


Figura 3.51: Cronograma de proyecto de red de acceso de fibra óptica.

Este proyecto cumple con los requerimientos de presupuesto y plazo. El presupuesto a precio de venta se encuentra \$1,652.88 por debajo del presupuesto requerido. El plazo de proyecto se cumple con 4 días de margen.

Si se aplica la metodología TOC se observa lo siguiente, el plazo de proyecto y el presupuesto se recortan. El plazo de ejecución del proyecto se acorta a una duración de 4 semanas con un buffer de proyecto de 3 semanas y un día, lo que corresponde al 44.4% de la duración de proyecto. El presupuesto se reduce a \$50,220.00 lo que nos arroja un buffer de costo de proyecto de \$11,520.00 que corresponde al 18.65% del costo directo del proyecto.

La Figura 3.52 muestra el presupuesto y plazo del proyecto bajo la metodología TOC. La Figura 3.53 muestra el cronograma de proyecto.

Nombre de tarea	Duración	Costo
<input type="checkbox"/> Construcción de red de acceso	36 días	\$50,220.00
Licitación	4 días	\$0.00
Planeación	3 días	\$3,200.00
<i>buffer</i>	1 día	\$0.00
Licencias y permisos	2 días	\$0.00
<i>buffer</i>	1 día	\$0.00
Presupuesto	2 días	\$0.00
Programa de suministros	1 día	\$0.00
Procura de materiales	2 días	\$31,000.00
<input type="checkbox"/> Ejecución de obra	4 días	\$15,020.00
<input type="checkbox"/> Acometida	2 días	\$3,380.00
Supervisión de obra	2 días	\$500.00
Canalización	1 día	\$1,440.00
Tendido de FO	1 día	\$1,440.00
<input type="checkbox"/> Cableado	4 días	\$7,760.00
Supervisión de obra	4 días	\$2,000.00
Cablado de FO	4 días	\$5,760.00
<input type="checkbox"/> Cuarto de comunicaciones	2 días	\$3,880.00
Supervisión de obra	2 días	\$1,000.00
Conexión de equipos	2 días	\$2,880.00
Carpeta de proyecto	2 días	\$0.00
<i>buffer</i>	1 día	\$0.00
Recepción preliminar	4 días	\$1,000.00
Entrega a cliente	2 días	\$0.00
Liquidación	1 día	\$0.00
<i>Buffer de proyecto</i>	16 días	\$0.00
Todas las tareas terminadas	0 días	\$0.00

Figura 3.52: Presupuesto a costo directo y duración de tareas aplicando la metodología TOC para el proyecto de red de acceso de fibra óptica.

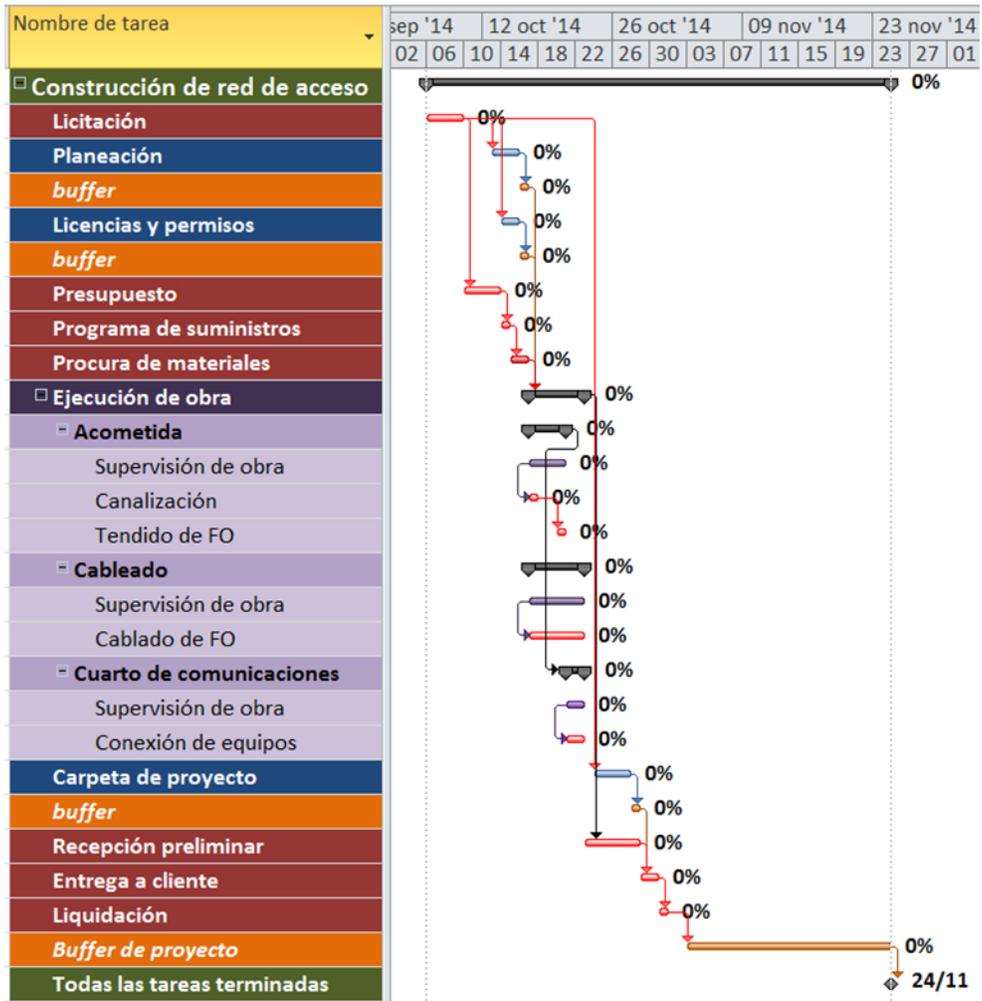


Figura 3.53: Cronograma del proyecto aplicando la metodología TOC para el proyecto de red de acceso de FO.

3.1.3 Proyecto de construcción de red HFC.

El escenario para el modelo de un proyecto de construcción de una red HFC es el siguiente:

Una operadora de servicios de Triple Play requiere construir una red HFC en una colonia de 200 casas. Se requiere realizar el nodo HFC, el cableado y la instalación de equipos. El plazo es de 12 semanas y el presupuesto es de \$125,000.00.

De acuerdo al enunciado del planteamiento, el presupuesto es de \$125,000.00 y el plazo del proyecto es de 12 semanas. El alcance del proyecto es el siguiente:

- Instalación y tendido de cable coaxial auto soportado calibre 0.500 sobre postera existente.
- Instalación de herrajes de sujeción en postera existente.
- Instalación de fuente de poder AC y sistema de tierra física.
- Instalación, ecualización y configuración de amplificador para red coaxial.
- Instalación de TAPs con derivación para las 200 casas.

El presupuesto y plazo del proyecto integrando todas las tareas y recursos se muestra en la Figura 3.54. Se puede observar un plazo estimado de proyecto de 10 semanas y dos días. El presupuesto a costo directo del proyecto es de \$103,580.00.

Nombre de tarea	Nombres de los recursos	Duración	Costo
Construcción de red HFC		52 días	\$103,580.00
- Licitación		7 días	\$0.00
- Propuesta		5 días	\$0.00
Estudio de factibilidad	Admin. Técnica	2 días	\$0.00
Prediseño y presupuesto	Líder de proyecto, Admin. Técnica	3 días	\$0.00
- Adjudicación		2 días	\$0.00
Contrato u orden de trabajo	Líder de proyecto	2 días	\$0.00
- Planeación		7 días	\$3,200.00
- Carpeta de proyecto		7 días	\$0.00
Memoria descriptiva	Admin. Técnica	2 días	\$0.00
Presupuesto de obra	Costos	4 días	\$0.00
Organigrama	Líder de proyecto	1 día	\$0.00
Análisis de riesgos	Líder de proyecto	1 día	\$0.00
Plan de ejecución	Líder de proyecto	2 días	\$0.00
Programa de suministros	Líder de proyecto	2 días	\$0.00
Flujo de ingresos y egresos	Líder de proyecto	1 día	\$0.00

- Ingeniería		4 días	\$3,200.00
Planos de red HFC	Ingeniería telecom	4 días	\$3,200.00
- Licencias y permisos		4 días	\$0.00
Preparación de documentos	Legal	2 días	\$0.00
Pago y obtención de permisos	Legal	2 días	\$0.00
Procura de materiales	Compras	2 días	\$42,000.00
- Ejecución de obra		24 días	\$57,380.00
- Instalación de herrajes		10 días	\$18,000.00
Supervisión de obra	Supervisor	10 días	\$3,600.00
Instalación de herrajes	Obra civil cuadrilla 1	10 días	\$14,400.00
- Cableado		14 días	\$24,760.00
Supervisión de obra	Supervisor	14 días	\$4,600.00
Tendido de cable coaxial	Telecom. cuadrilla 1	14 días	\$20,160.00
- Instalación de equipos		8 días	\$14,620.00
Supervisión de obra	Supervisor	8 días	\$3,100.00
Equipos activos	Telecom. cuadrilla 2	4 días	\$5,760.00
Equipos pasivos	Telecom. cuadrilla 2	2 días	\$2,880.00
Fuente de poder	Telecom. cuadrilla 2	2 días	\$2,880.00
- Entrega		11 días	\$1,000.00
- Recepción preliminar		7 días	\$1,000.00
Validación de pruebas	Supervisor	2 días	\$1,000.00
Carpeta de fin de proyecto	Líder de proyecto, Admin. Técnica	5 días	\$0.00
- Entrega a cliente		4 días	\$0.00
Actas de recepción	Líder de proyecto	2 días	\$0.00
Finiquito de obra	Líder de proyecto	2 días	\$0.00
- Liquidación		2 días	\$0.00
- Liquidación a cliente		1 día	\$0.00
Presentación de factura de venta	Liquidaciones	1 día	\$0.00
- Liquidación de proveedores		1 día	\$0.00
Pago de facturas de proveedor	Liquidaciones	1 día	\$0.00
Todas las tareas terminadas	Líder de proyecto	0 días	\$0.00

Figura 3.54: Presupuesto a costo directo integrando duración de tareas y recursos para el proyecto de red HFC.

Si se considera un 8% de costos indirectos, el costo de proyecto es:

$$CI = \$8,286.40$$

$$CD + CI = \$111,866.40$$

Si se considera una utilidad de 10%, el precio de venta de proyecto y su utilidad son:

$$PV = \$123,053.04$$

$$U = \$11,186.64$$

La Figura 3.55 muestra el cronograma del proyecto.

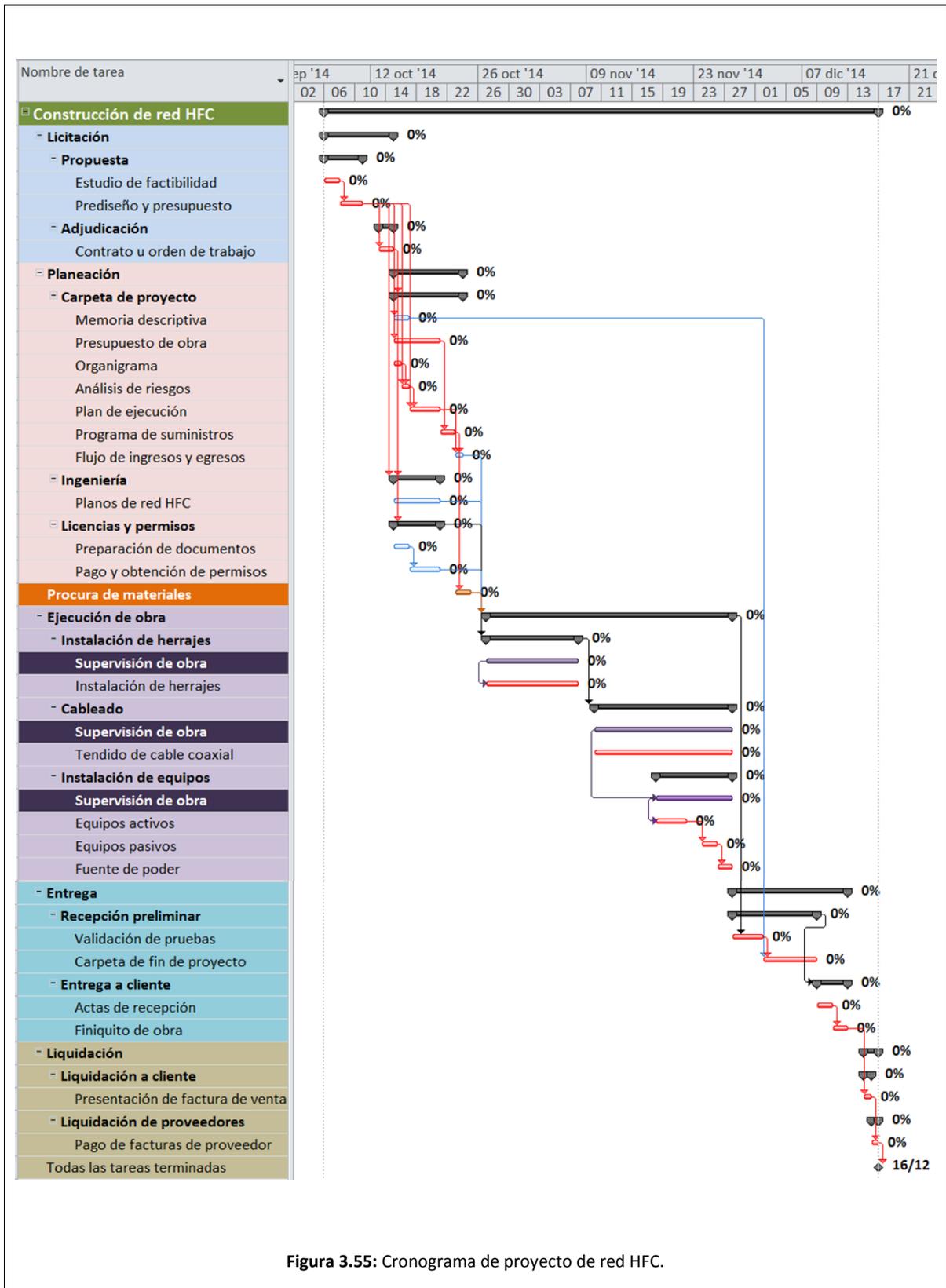


Figura 3.55: Cronograma de proyecto de red HFC.

Si se aplica la metodología TOC se observa que el plazo de proyecto y el presupuesto se recortan. El plazo de ejecución del proyecto se reduce a 5 semanas y 4 días, teniendo un buffer de tiempo de proyecto de 4 semanas y 3 días, lo que corresponde al 44.23% del plazo del proyecto. El presupuesto se reduce a \$80,540.00 lo que es \$23,040.00 por debajo del presupuesto estimado a costo directo, esto corresponde al 22.24%. La Figura 3.56 muestra el presupuesto y plazo del proyecto al aplicar la metodología TOC. La Figura 3.57 muestra el cronograma del proyecto.

Nombre de tarea	Duración	Costo
Construcción de red HFC	53 días	\$80,540.00
Licitación	4 días	\$0.00
Planeación	4 días	\$3,200.00
<i>buffer</i>	1 día	\$0.00
Licencias y permisos	2 días	\$0.00
<i>buffer</i>	1 día	\$0.00
Presupuesto	2 días	\$0.00
Programa de suministros	2 días	\$0.00
Procura de materiales	2 días	\$42,000.00
Ejecución de obra	12 días	\$34,340.00
Instalación de herrajes	5 días	\$10,800.00
Supervisión de obra	5 días	\$3,600.00
Instalación de herrajes	5 días	\$7,200.00
Cableado	7 días	\$14,680.00
Supervisión de obra	7 días	\$4,600.00
Tendido de cable coaxial	7 días	\$10,080.00
Instalación de equipos	4 días	\$8,860.00
Supervisión de obra	4 días	\$3,100.00
Equipos activos	2 días	\$2,880.00
Equipos pasivos	1 día	\$1,440.00
Fuente de poder	1 día	\$1,440.00
Carpeta de proyecto	4 días	\$0.00
<i>buffer</i>	1 día	\$0.00
Recepción preliminar	4 días	\$1,000.00
Entrega a cliente	2 días	\$0.00
Liquidación	1 día	\$0.00
<i>Buffer de proyecto</i>	24 días	\$0.00
Todas las tareas terminadas	0 días	\$0.00

Figura 3.56: Presupuesto a costo directo y duración de tareas aplicando la metodología TOC para el proyecto de red HFC.

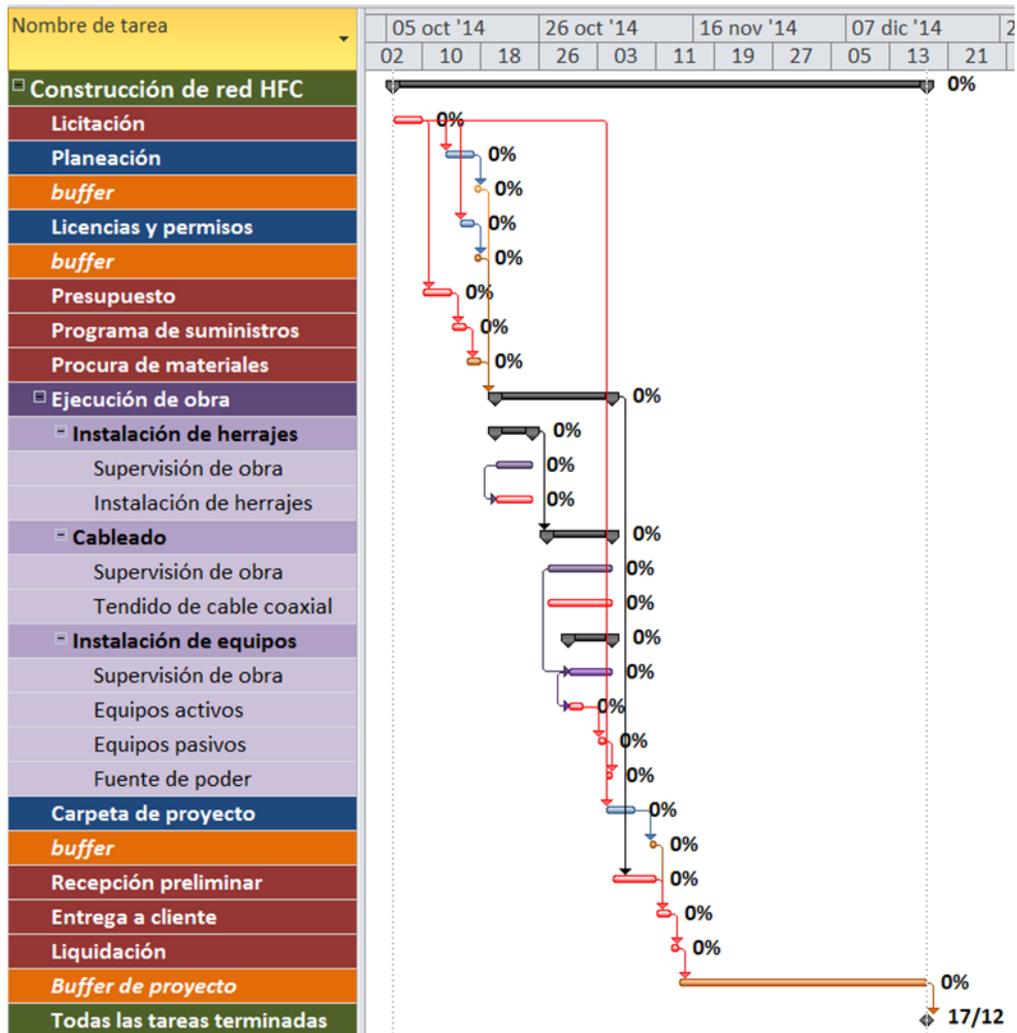


Figura 3.57: Cronograma del proyecto aplicando la metodología TOC para el proyecto de red HFC.

3.1.4 Proyecto de construcción de radio base.

El escenario para el modelo de un proyecto de construcción de radio base es el siguiente:

Una operadora de telefonía móvil requiere construir una radio base de tecnología 4G-LTE en una zona residencial. Se requiere gestionar la obtención del sitio más adecuado para su construcción, el montaje de la torre, la acometida eléctrica, la acometida de fibra óptica y la instalación de equipos y antenas. El plazo del proyecto es de 12 semanas y el presupuesto es de \$225,000.00 a precio de venta.

De acuerdo al enunciado del planteamiento, el presupuesto es de \$225,000.00 y el plazo es de 12 semanas. El alcance del proyecto es el siguiente:

- Gestión y obtención del sitio.
- Cimentación y montaje de torre mono polo de 60 [m].
- Acometida de fibra óptica desde la red pública hasta el cuarto de radio comunicación.
- Acometida y proyecto eléctrico, incluye sistema de tierras y pararrayos.
- Suministro y colocación de antenas 4G-LTE.
- Instalación de gabinete de radio comunicación.

El presupuesto y plazo del proyecto integrando todas las tareas y recursos se muestra en la Figura 3.58. Se puede observar un plazo estimado de proyecto de 11 semanas y dos días. El presupuesto a costo directo del proyecto es de \$187,620.00.

Nombre de tarea	Nombres de los recursos	Duración	Costo
Construcción de radio base		57 días	\$187,620.00
- Licitación		12 días	\$21,000.00
- Propuesta		7 días	\$0.00
Prediseño y presupuesto	Líder de proyecto,Admin. Técnica	5 días	\$0.00
- Adjudicación		2 días	\$0.00
Contrato u orden de trabajo	Líder de proyecto	2 días	\$0.00
- Gestorias		5 días	\$21,000.00
Obtención del sitio	Gestorias	5 días	\$21,000.00
- Planeación		11 días	\$16,700.00
- Carpeta de proyecto		11 días	\$0.00
Anteproyecto	Líder de proyecto	2 días	\$0.00
Presupuesto de obra	Costos	4 días	\$0.00
Organigrama	Líder de proyecto	1 día	\$0.00
Análisis de riesgos	Líder de proyecto	1 día	\$0.00
Plan de ejecución	Líder de proyecto	3 días	\$0.00
Programa de suministros	Líder de proyecto	2 días	\$0.00
Flujo de ingresos y egresos	Líder de proyecto	3 días	\$0.00

- Ingeniería		6 días	\$4,700.00
Proyecto eléctrico	Ingeniería eléctrica	2 días	\$1,200.00
Proyecto de fibra óptica	Ingeniería telecom	2 días	\$1,100.00
Proyecto de sistema de tierras	Ingeniería eléctrica	2 días	\$800.00
Planos de proyecto	Ingeniería telecom	4 días	\$1,600.00
- Licencias y permisos		5 días	\$12,000.00
Preparación de documentos	Legal	3 días	\$0.00
Pago y obtención de permisos	Legal	2 días	\$12,000.00
Procura de materiales	Compras	3 días	\$76,000.00
- Ejecución de obra		26 días	\$72,920.00
- Obra civil		10 días	\$21,800.00
Supervisión de obra	Supervisor	10 días	\$7,400.00
Cimentación de torre	Obra civil cuadrilla 1	10 días	\$14,400.00
- Torre		10 días	\$19,000.00
Supervisión de obra	Supervisor	10 días	\$4,600.00
Montaje de torre	Obra civil cuadrilla 1	5 días	\$7,200.00
Montaje de feeders y antenas	Telecom. cuadrilla	5 días	\$7,200.00
- Obra eléctrica		12 días	\$21,380.00
Supervisión de obra		12 días	\$4,100.00
Instalación eléctrica	Obra civil cuadrilla 2	8 días	\$11,520.00
Sistema de tierras	Obra civil cuadrilla 2	4 días	\$5,760.00
- Equipamiento y adicionales		6 días	\$10,740.00
Supervisión de obra		6 días	\$2,100.00
Instalación de gabinetes	Telecom. cuadrilla	6 días	\$8,640.00
- Entrega		11 días	\$1,000.00
- Recepción preliminar		7 días	\$1,000.00
Validación de pruebas	Supervisor	2 días	\$1,000.00
Carpeta de fin de proyecto	Líder de proyecto, Admin. Técnica	5 días	\$0.00
- Entrega a cliente		4 días	\$0.00
Actas de recepción	Líder de proyecto	2 días	\$0.00
Finiquito de obra	Líder de proyecto	2 días	\$0.00
- Liquidación		2 días	\$0.00
- Liquidación a cliente		1 día	\$0.00
Presentación de factura de venta	Liquidaciones	1 día	\$0.00
- Liquidación de proveedores		1 día	\$0.00
Pago de facturas de proveedor	Liquidaciones	1 día	\$0.00
Todas las tareas terminadas	Líder de proyecto	0 días	\$0.00

Figura 3.58: Presupuesto a costo directo integrando duración de tareas y recursos para el proyecto de construcción de radio base.

Si se considera un 8% de costos indirectos, el costo de proyecto es:

$$CI = \$15,009.60$$

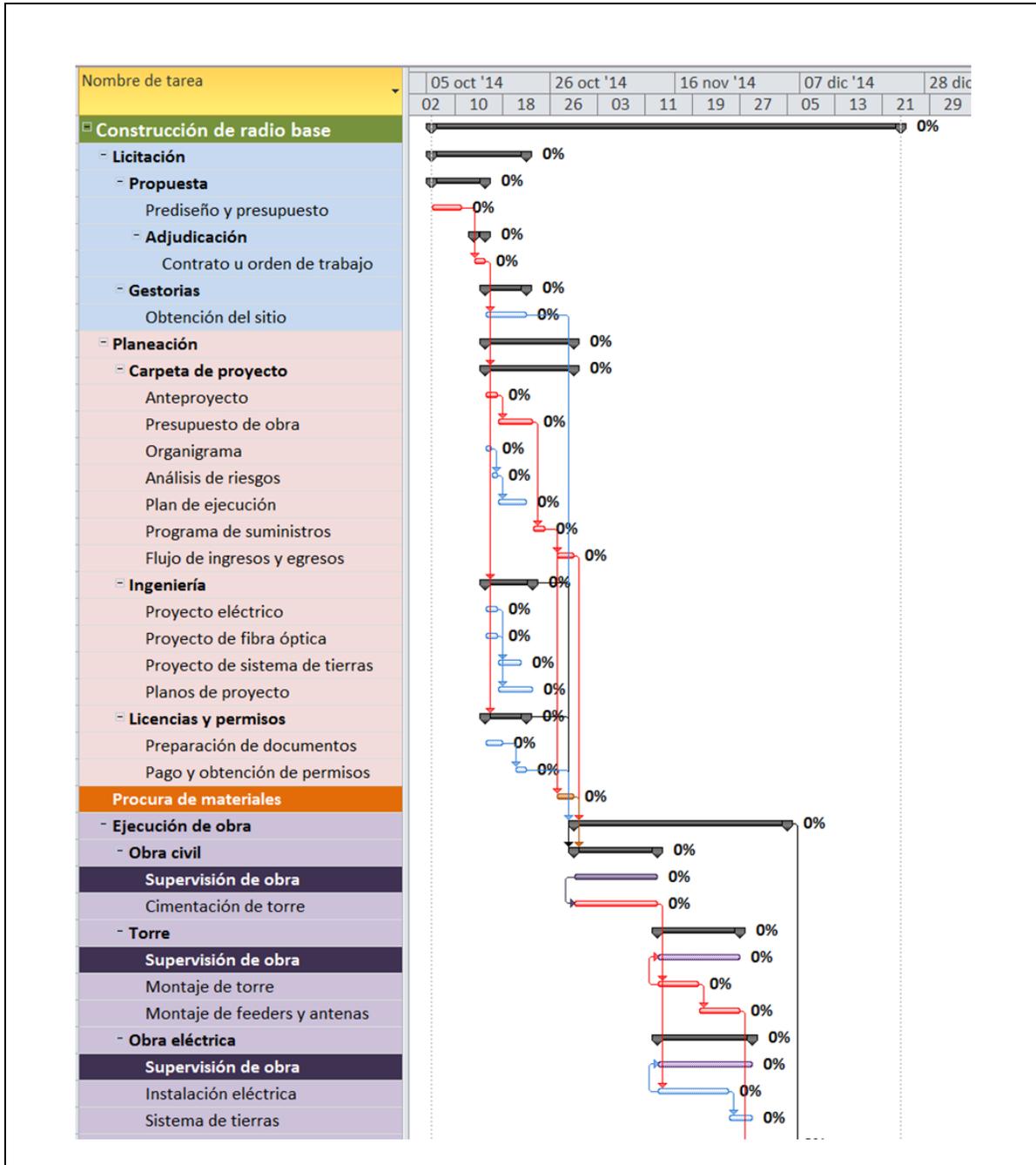
$$CD + CI = \$202,629.60$$

Si se considera una utilidad de 10%, el precio de venta de proyecto y su utilidad son:

$$PV = \$222,892.56$$

$$U = \$20,262.96$$

La Figura 3.59 muestra el cronograma del proyecto de construcción de la radio base.



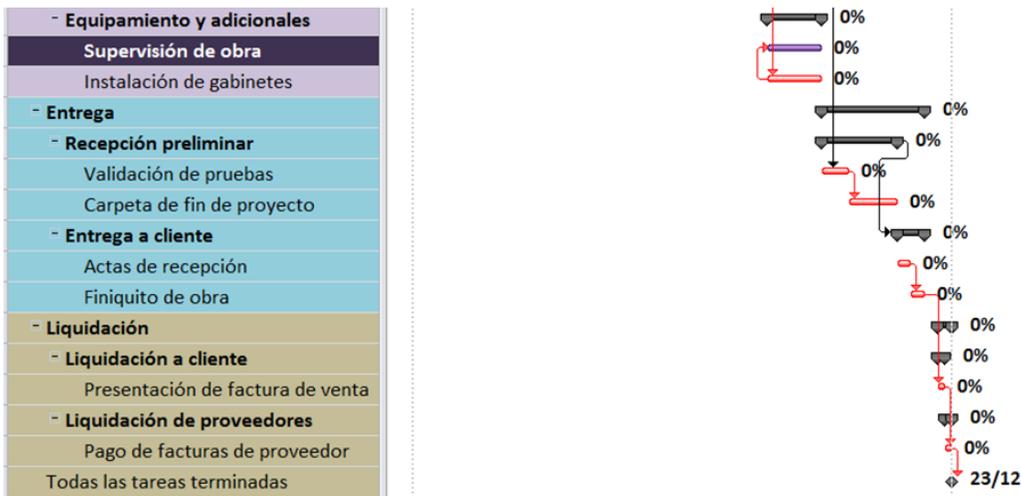


Figura 3.59: Cronograma de proyecto de construcción de radio base.

Al aplicarse la metodología TOC se observa que el plazo de proyecto y el presupuesto se recortan. El plazo de ejecución del proyecto se reduce a 7 semanas, teniendo un buffer de tiempo de proyecto de 4 semanas y 2 días, lo que corresponde al 35.08% del plazo del proyecto. El presupuesto se reduce a \$160,260.00 lo que es \$27,360.00 por debajo del presupuesto estimado a costo directo, esto corresponde al 14.58%. La Figura 3.60 muestra el presupuesto y plazo del proyecto al aplicar la metodología TOC. La Figura 3.61 muestra el cronograma del proyecto.

Nombre de tarea	Duración	Costo
Construcción de radio base	57 días	\$160,260.00
Licitación	4 días	\$0.00
Gestorías	3 días	\$21,000.00
buffer	1 día	\$0.00
Licencias y permisos	2 días	\$12,000.00
buffer	1 día	\$0.00
Planeación	8 días	\$4,700.00
Presupuesto	2 días	\$0.00
Programa de suministros	1 día	\$0.00
Procura de materiales	2 días	\$76,000.00
buffer	2 días	\$0.00

□ Ejecución de obra	16 días	\$45,560.00
▫ Obra civil	5 días	\$14,600.00
Supervisión de obra	5 días	\$7,400.00
Cimentación de torre	5 días	\$7,200.00
▫ Torre	5 días	\$11,800.00
Supervisión de obra	5 días	\$4,600.00
Montaje de torre	3 días	\$4,320.00
Montaje de feeders y antenas	2 días	\$2,880.00
▫ Obra eléctrica	6 días	\$12,740.00
Supervisión de obra	6 días	\$4,100.00
Instalación eléctrica	4 días	\$5,760.00
Sistema de tierras	2 días	\$2,880.00
▫ Equipamiento y adicionales	6 días	\$6,420.00
Supervisión de obra	6 días	\$2,100.00
Instalación de gabinetes	3 días	\$4,320.00
Carpeta de proyecto	2 días	\$0.00
<i>buffer</i>	1 día	\$0.00
Recepción preliminar	4 días	\$1,000.00
Entrega a cliente	2 días	\$0.00
Liquidación	1 día	\$0.00
<i>Buffer de proyecto</i>	22 días	\$0.00
Todas las tareas terminadas	0 días	\$0.00

Figura 3.60: Presupuesto a costo directo y duración de tareas aplicando la metodología TOC para el proyecto de construcción de radio base.

3.2. Presentación y discusión de resultados

Analizando los resultados obtenidos en el modelo de gestión de proyecto para los cuatro casos de uso desarrollados previamente, es posible apreciar que la motivación de la metodología TOC propuesta es de hacer más eficiente el proyecto en sus estimaciones de plazo y presupuesto. La Tabla 3.6 muestra la comparativa en las proyecciones de costo y tiempo, considerando el mismo alcance, entre los dos métodos de administración de proyectos, el enfoque tradicional y la metodología aquí propuesta.

Tabla 3.6: Comparativa de desempeño para proyectos de construcción de telecomunicaciones bajo el esquema tradicional de proyectos y la metodología basada en Teoría de Restricciones.

Proyecto	Plazo bajo el esquema tradicional	Plazo bajo el esquema TOC	Buffer de tiempo de proyecto	Ppto. bajo el esquema tradicional	Ppto. bajo el esquema TOC	Buffer de costo de proyecto
Red telefónica de FO	47 días	27 días	20 días 42.55%	\$81,850.00	\$64,570.00	\$17,280.00 21.11%
Red de acceso de FO	36 días	20 días	16 días 44.44%	\$61,740.00	\$50,220.00	\$11,520.00 18.65%
Red HFC	52 días	29 días	23 días 44.23%	\$103,580.00	\$80,540.00	\$23,040.00 22.24%
Radio base	57 días	35 días	22 días 38.59%	\$187,620.00	\$160,260.00	\$27,360.00 14.58%

De la tabla anterior se puede observar que el porcentaje promedio de buffer de tiempo de proyecto para los cuatro proyectos es de 42.45%, el cual es un valor muy alto de eficiencia en el cumplimiento del plazo. Para el caso del buffer de costo de proyecto se tiene un porcentaje promedio para los cuatro proyectos de 19.14%, el cual también es un valor muy alto. Estos datos son reveladores ya que si se considera que en una buena parte de los proyectos de construcción se tienen retrasos por arriba del 20% del plazo de proyecto y sus sobre costos asociados que afectan la utilidad, en muchos casos saliendo con pérdidas, esta metodología no solo puede contrarrestar los problemas citados sino que además promueve el generar mayores márgenes de utilidad para este tipo de proyectos.

Generalmente cuando se presenta una oferta con una propuesta económica se acostumbra manejar un precio de venta competitivo que esté por debajo del requerimiento del proyecto y una vez adjudicado el mismo, se trabaja con una proforma de costo con estimaciones más reales de tiempo y costo buscando tener un mayor margen de utilidad. Bajo esta premisa las empresas que

operan este tipo de proyectos deberán generar sus ofertas bajo el esquema tradicional, donde no se les cuestione el porcentaje de utilidad e indirectos por parte del cliente, ya que estos no llegan al 20% del valor del proyecto. Una vez iniciado el proyecto se deberá administrar bajo el esquema de la metodología TOC aquí propuesta por dos motivos principalmente: el tener protecciones de proyecto altas en costo y tiempo que permitan un rango de maniobra amplio para el líder de proyecto en caso de que los imprevistos se presenten (lo que muy seguramente sucederá); y por otro lado el poder generar un mayor margen de utilidad en un menor tiempo de ejecución, lo que se traduce en una mayor rentabilidad del negocio.

Si se piensa en operaciones que manejen varios proyectos de forma simultánea, lo que es una generalidad en la industria de las comunicaciones, la rentabilidad del negocio será aún mayor ya que la disponibilidad de los recursos es más cercana al 100% y los tiempos muertos y sobre costos asociados a éstos se reducen significativamente.

Conclusiones

En este proyecto de tesis se presentó una propuesta de metodología para la gestión de proyectos de infraestructura en telecomunicaciones basada en la Teoría de Restricciones (TOC). Se analizó el escenario actual de la industria en México y se presentaron los elementos principales en la ingeniería, el diseño y la estimación de este tipo de proyectos. Se describió la metodología de uso más común en la industria actual, la cual está basada en las políticas y estándares del PMI y se retomaron los puntos esenciales de dichas prácticas, las cuales fueron complementadas con los fundamentos de TOC para así dar paso a la propuesta de una metodología novedosa y de vanguardia que busca elevar la rentabilidad de este tipo de negocios.

Finalmente se presentaron cuatro casos de uso de diferentes tipos de proyectos en telecomunicaciones, en los cuales se buscó ejemplificar, por un lado la aplicación de la metodología en cada caso y por otro demostrar la mejora en el desempeño de los proyectos tomando en cuenta los parámetros principales de control que son el tiempo, el costo y el alcance. Es importante resaltar que si bien los cuatro casos de uso tienen particularidades propias del tipo de trabajo que se requiere en cada uno de ellos, la metodología pretende ser genérica y de esta manera pueda aplicar en todos los trabajos propios de la industria de las telecomunicaciones.

También es importante dejar claro que el éxito en el desempeño de los proyectos gestionados bajo esta metodología está en función de la capacidad de gestión, los conocimientos y la experiencia del líder de proyecto, así como de la integración correcta del esfuerzo de todos los recursos que intervengan en el proceso. A pesar de estas consideraciones, el autor de este trabajo considera que la puesta en práctica de esta metodología generará resultados desde el principio de su puesta en operación, ya que la mejora continua de todos los procesos que intervienen en cada proyecto es una práctica permanente que desde el principio y hasta la culminación del proyecto no se detiene, por el contrario permanece de forma constante y que se incrementa a medida que la operación continúa a lo largo del tiempo.

A los lectores, gracias.

Bibliografía

- Agrawal, G. P. (2002). *Fiber-Optic Communication Systems* (3a ed.). Ney York, EEUU: John Wiley and Sons Inc.
- Bianchi, R. (2013). *Cadena de Esfuerzos Eficientes*. Montevideo: manosanta desarrollo editorial.
- CMIC. (2013). *Presentación ejecutiva del Entorno Actual y futura de la Industria de la Construcción en México*. México: Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción.
- COFETEL. (2013). *El sector telecomunicaciones creció 9.5 por ciento durante el segundo trimestre de 2013*. México: Comisión Federal de Telecomunicaciones.
- Fluke Corporation. (2014). *OTDR*. Recuperado el 20 de Agosto de 2014, de <http://es.flukenetworks.com/expertise/learn-about/otdr>
- Goldratt, E. M. (2001). *Cadena Crítica*. Madrid, España: Ediciones Díaz de Santos.
- Goldratt, E. M. (2005). *La Meta: Un Proceso de Mejora Continua*. Díaz de Santos.
- Huidobro, J. M. (2006). *Redes y servicios de telecomunicaciones* (4a ed.). Madrid, España: Thomson Editores.
- INEGI. (2011). *Estadística sobre disponibilidad y uso de tecnología de información en los hogares, 2010*. México: Instituto Nacional Estadística y Geografía.
- ITU. (2010). *Optical fibres, cables and systems. ITU-T Manual 2009*.
- Oliviero, A., & Woodward, B. (2009). *Cabling - The Complete Guide to Copper and Fiber-Optic Networking* (4a ed.). Indianapolis, Indiana, EEUU: Wiley Publishing Inc.
- Parkinson, C. N. (1957). *Parkinson's Law And Other Studies In Administration*. Cambridge, Massachusetts, EEUU: The Riverside Press.
- PMI. (2007). *Consdtruction Extension to The PMBOK Guide* (3a ed.). Newton Square, Pennsylvania, EEUU: Project Management Institute, Inc.
- PMI. (2008). *Guía de los Fundamentos para la Dirección de Proyectos* (4a ed.). Newton Square, Pennsylvania, EEUU: Proyect Management Institute, Inc.
- Ramaswami, R., Sivarajan, K. N., & Sasaki, G. H. (2010). *Optical Networks - A Practical Perspective* (3a ed.). Burlington, MA, USA: Morgan Kaufmann Publishers.
- Tisal, J. (2000). *La red GSM*. Madrid, España: International Thomson Editores Spain Paraninfo, S. A.
- Villacreses L, P. (2013). *Planta Externa Training. Academy Conference Latin American and the Caribbean 2013*. Cisco Networking Academy.

Tabla de figuras

Figura i.1: Evolución de la tasa de bits por <i>km</i> en el periodo 1850-2000. Cada círculo representa el surgimiento de una nueva tecnología. (Agrawal, 2002)	10
Figura i.2: Esquema general de una red pública de comunicaciones. (Ramaswami, Sivarajan, & Sasaki, 2010).....	12
Figura i.3: Espectro electromagnético.....	13
Figura i.4: Representación de (a) una señal analógica y (b) una señal digital. (Ramaswami, Sivarajan, & Sasaki, 2010)	14
Figura 1.5: Cable comercial de fibra óptica ADSS (<i>All Dielectric Self-Supported</i>). (Villacreses L, 2013)	18
Figura 1.6: (a) Sección transversal y perfil de índice de refracción para una fibra de índice escalonado. (b) Sección transversal y perfil de índice de refracción para una fibra de índice gradual. (Agrawal, 2002)	19
Figura 1.7: Confinamiento de la luz en reflexión total interna en una fibra de índice escalón. Los rayos para los que $\varphi < \varphi_c$ son refractados fuera del núcleo. (Agrawal, 2002)	20
Figura 1.8: Los tres tipos principales de fibra óptica. (ITU, 2010)	21
Figura 1.9: Coeficiente de atenuación del silicio en función de la longitud de onda λ . (Ramaswami, Sivarajan, & Sasaki, 2010)	23
Figura 1.10: Límite de <i>L</i> en pérdidas y dispersión en función de <i>B</i> para fibras ópticas operando en las tres bandas. (Agrawal, 2002)	24
Figura 1.11: Enlace punto a punto de fibra óptica, las pérdidas se compensan por medio de amplificadores ópticos. (Agrawal, 2002).....	27
Figura 1.12: Topología <i>hub</i> para una red telefónica de distribución de fibra óptica. (Agrawal, 2002)	27
Figura 1.13: (a) Topología de anillo y (b) topología de estrella para una red de acceso. (Agrawal, 2002)	28
Figura 2.14: Ciclo de vida de un proyecto en términos del costo contra el tiempo. (PMI, 2008)	33
Figura 2.15: Proceso a nivel 1 de un proyecto de construcción.	34
Figura 2.16: EDT de un proyecto de construcción con desglose de actividades a nivel 2.	36
Figura 2.17: PDM de las actividades de un proyecto de construcción.	36
Figura 2.18: Funciones de probabilidad para el cumplimiento de una tarea.	38
Figura 2.19: Cálculo de probabilidad de inicio de una tarea en función del cumplimiento de sus predecesoras.	39
Figura 2.20: Conflicto principal en la administración de proyectos tradicional.	43
Figura 2.21: Supuesto que sustenta el argumento del conflicto en la administración de proyectos tradicional.	44

Figura 2.22: Diagrama lógico de la práctica común de administración de proyectos. (Bianchi, 2013) 46

Figura 2.23: Grafico de temperatura para la evaluación de los indicadores de desempeño. 54

Figura 2.24: EDT de un proyecto de construcción de red telefónica de fibra óptica. 56

Figura 2.25: Diagrama PDM para un proyecto de construcción de red telefónica de FO. 57

Figura 2.26: Diagrama PDM-TOC considerando sólo dependencias de cumplimiento de tareas para un proyecto de construcción de red telefónica de FO..... 57

Figura 2.27: Organigrama funcional para un proyecto de construcción de red telefónica de FO. .. 59

Figura 2.28: Diagrama PDM-TOC considerando la dependencia de recursos y cumplimiento de tareas para un proyecto de construcción de red telefónica de FO..... 60

Figura 2.29: Cronograma de proyecto con actividades críticas representadas por las barras color rojo y las tareas secundarias representadas por las barras color azul para el proyecto de red telefónica de FO. 61

Figura 2.30: Cronograma de proyecto con actividades críticas, cadenas secundarias, buffers de alimentación y buffer de tiempo de proyecto para el proyecto de red telefónica de FO. 61

Figura 2.31: EDT de un proyecto de construcción de red de acceso de fibra óptica..... 63

Figura 2.32: Diagrama PDM para el proyecto de red de acceso de FO. 63

Figura 2.33: Diagrama PDM-TOC para el proyecto de red de acceso de FO. 64

Figura 2.34: Cronograma de proyecto con actividades críticas representadas por las barras color rojo y las tareas secundarias representadas por las barras color azul para el proyecto de red de acceso de FO. 65

Figura 2.35: Cronograma de proyecto con actividades críticas, cadena secundaria, buffer de alimentación y buffer de proyecto para el proyecto de red de acceso de FO..... 65

Figura 2.36: EDT de un proyecto de construcción de red HFC. 67

Figura 2.37: Diagrama PDM para el proyecto de red HFC. 67

Figura 3.38: Diagrama PDM-TOC para el proyecto de red HFC. 68

Figura 2.39: Cronograma de proyecto con actividades críticas representadas por las barras color rojo y las tareas secundarias representadas por las barras color azul para el proyecto de red HFC. 68

Figura 2.40: Cronograma de proyecto con actividades críticas, cadena secundaria, buffer de alimentación y buffer de proyecto para el proyecto de red HFC..... 69

Figura 2.41: EDT de un proyecto de construcción de radio base. 71

Figura 2.42: Diagrama PDM para el proyecto de construcción de radio base 71

Figura 2.43: Diagrama PDM-TOC para el proyecto de construcción de radio base. 72

Figura 2.44: Cronograma de proyecto con actividades críticas representadas por las barras color rojo y las tareas secundarias representadas por las barras color azul para el proyecto de radio base. 73

Figura 2.45: Cronograma de proyecto con actividades críticas, cadena secundaria, buffer de alimentación y buffer de proyecto para el proyecto de radio base..... 73

Figura 3.46: Presupuesto a costo directo integrando duración de tareas y recursos para el proyecto de red telefónica de fibra óptica.	78
Figura 3.47: Cronograma de proyecto de red telefónica de FO.	79
Figura 3.48: Presupuesto a costo directo y duración de tareas aplicando la metodología TOC para el proyecto de red telefónica de FO.	80
Figura 3.49: Cronograma del proyecto aplicando la metodología TOC para el proyecto de red telefónica de FO.	81
Figura 3.50: Presupuesto a costo directo integrando duración de tareas y recursos para el proyecto de red de acceso de fibra óptica.	84
Figura 3.51: Cronograma de proyecto de red de acceso de fibra óptica.	85
Figura 3.52: Presupuesto a costo directo y duración de tareas aplicando la metodología TOC para el proyecto de red de acceso de fibra óptica.	86
Figura 3.53: Cronograma del proyecto aplicando la metodología TOC para el proyecto de red de acceso de FO.	87
Figura 3.54: Presupuesto a costo directo integrando duración de tareas y recursos para el proyecto de red HFC.	89
Figura 3.55: Cronograma de proyecto de red HFC.	90
Figura 3.56: Presupuesto a costo directo y duración de tareas aplicando la metodología TOC para el proyecto de red HFC.	91
Figura 3.57: Cronograma del proyecto aplicando la metodología TOC para el proyecto de red HFC.	92
Figura 3.58: Presupuesto a costo directo integrando duración de tareas y recursos para el proyecto de construcción de radio base.	94
Figura 3.59: Cronograma de proyecto de construcción de radio base.	96
Figura 3.60: Presupuesto a costo directo y duración de tareas aplicando la metodología TOC para el proyecto de construcción de radio base.	97
Figura 3.61: Cronograma del proyecto aplicando la metodología TOC para el proyecto de construcción de radio base.	98

Tabla 2.1: Comparación entre las características de proyectos del Sector Telecomunicaciones y otros Sectores de Construcción.	47
Tabla 2.2: Relación de recursos por actividad y entregables	58
Tabla 3.3: Características de los cables ópticos que se utilizarán en el proyecto de red telefónica.	75
Tabla 3.4: Rendimientos, duración y costo de recursos correspondientes al costo directo del proyecto de red telefónica de FO.	76
Tabla 3.5: Rendimientos duración y costo de recursos para el proyecto de red de acceso de FO.	82
Tabla 3.6: Comparativa de desempeño para proyectos de construcción de telecomunicaciones bajo el esquema tradicional de proyectos y la metodología basada en Teoría de Restricciones.	100