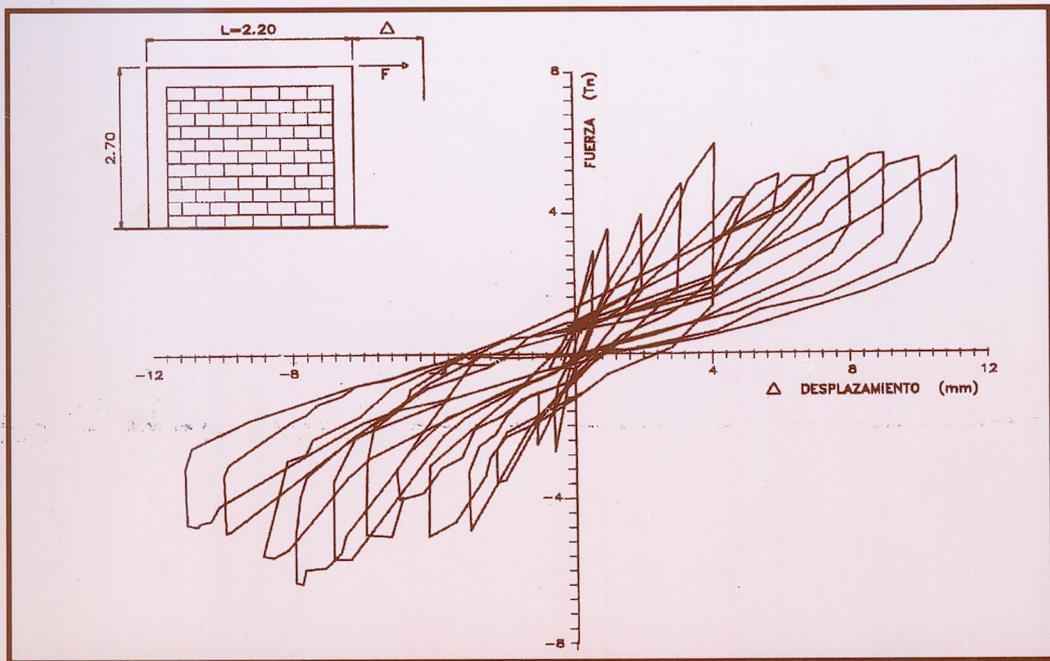


Ingeniería

Revista de la Universidad de Costa Rica
ENERO/JUNIO 1995 VOLUMEN 5 N° 1



UTILIZACION DE CONDUCTORES DE HIERRO GALVANIZADO EN LINEAS DE TRANSMISION PARA MINICENTRALES HIDROELECTRICAS

Ing. Roberto Trejos D.

RESUMEN

En este artículo se analiza el uso de cables de acero galvanizado, en sustitución de los conductores de aluminio con alma de acero (ACSR), en líneas de transmisión muy cortas, principalmente, en proyectos asociados a minicentrales hidroeléctricas. Se describen las características de los conductores a base de hierro, se comparan con las de los conductores ACSR y, finalmente, se hace la descripción de un caso práctico en el que se hizo uso de los conductores descritos. Se concluye que, a pesar de sus deficientes características eléctricas, debido a su bajo costo comparativo, puede ser rentable, en algunas circunstancias, el uso de conductores de acero galvanizado.

SUMMARY

This paper analyzes the possibility to use galvanized steel cable, instead of the traditional aluminium cable steel reinforced (ACSR), in very short transmission lines to be used in small scale hydroelectrical plants projects. It begins with the description of electrical and mechanical characteristics of iron based electrical conductors, followed by the comparison with ACSR conductors. Finally, a description of a practical case is made, in which steel cables have been used. The paper arrives to the conclusion that, in spite of their deficient electrical characteristics, due to their low cost, galvanized steel conductors can be profitable to use in some cases.

1. Introducción

Cuando se proyectan las diferentes partes de una minicentral hidroeléctrica (PCH), se debe buscar siempre diseñarlas de manera que su construcción pueda hacerse en la forma más económica posible. Con el fin de permitir una reducción en los costos, se recurre, si la situación lo permite, a elementos del diseño que no son tradicionales en proyectos mayores. Decisiones de este tipo permiten lograr, si se analizan adecuadamente, que un determinado proyecto sea rentable, o al menos económicamente factible, sin menoscabo en su calidad final. Es importante tomar en cuenta que los requisitos de un proyecto pequeño pueden ser diferentes a los de otro del mismo tipo, pero de dimensiones mayores: una minicentral hidroeléctrica no es una grande en miniatura.

Se acepta en este artículo las definiciones dadas por OLADE para pequeñas centrales hidroeléctricas (Ref [7]), en donde una pequeña central hidroeléctrica puede tener una potencia de hasta 5000 kilovatios y una minicentral hidroeléctrica tiene una capacidad máxima de 500 kilovatios.

Dentro de las situaciones que se han presentado, en estudios previos para proyectos de minicentrales hidroeléctricas, están los casos en los que la central debe instalarse a una distancia considerable de su centro de consumo, que para proyectos de este tipo puede ser más de seiscientos u ochocientos metros. En estas condiciones se debe pensar en transmitir la energía a un voltaje mayor al de consumo, lo que significa prever la instalación de transformadores elevadores y reductores, así como la correspondiente línea de transmisión en alto voltaje. Se ha encontrado que esta situación sube considerablemente los costos del proyecto, haciendo muy reducida su rentabilidad. Por lo tanto se hace necesario revisar todas las alternativas para realizarlo en una forma más económica. La alternativa de transmitir la energía sin variar el voltaje de transmisión llevaría a costos todavía más elevados.

Resulta muy difícil hacer una comparación en forma generalizada del costo que representaría el cable eléctrico con el resto del proyecto, ni siquiera es fácil hacerlo con respecto al costo de la línea de

transmisión (postes, aisladores, transformadores, etc.). De los datos suministrados por Olade (Ref. [8]) se llega a la conclusión de que para el caso de una minicentral típica de entre 5 y 10 kilovatios de capacidad, en la que deba llevarse la energía a una distancia de aproximadamente 1,5 kilómetros, la línea de transmisión puede representar más de una tercera parte del costo total del proyecto, dentro del que los conductores pueden ser un 20%, si se utilizan los materiales tradicionales. Por otro lado, es posible reducir considerablemente el costo de la línea de transmisión si hace uso de materiales de la zona para postes y al mismo tiempo se busca la forma de reducir otros costos asociados a ella. Es en este campo donde vale la pena evaluar la posibilidad de utilizar conductores de menor costo.

En el presente artículo se analiza la utilización de conductores de hierro galvanizado en sustitución de los cables de aluminio con alma de acero (ACSR, por sus siglas en inglés), que ha sido la mejor alternativa considerada en las líneas de transmisión tradicionales. Se sabe que el hierro no es un buen conductor de la electricidad, por lo que su uso con ese fin está muy limitado, pero para distancias cortas, y fundamentalmente cuando se desea reducir el costo de la línea de transmisión, puede ser conveniente analizar esta alternativa.

Aunque el uso de este material en líneas de transmisión muy cortas se recomienda en este documento exclusivamente para proyectos de minicentrales hidroeléctricas, se han detectado algunas otras aplicaciones no asociadas a proyectos de este tipo, en los que se requiere una línea de transmisión muy corta y al mismo tiempo se necesita reducir en lo posible sus costos, como es el caso, que ya se ha aplicado en el país, de extensión de líneas de transmisión después del medidor. Los resultados que se indican en este artículo pueden ser de utilidad también para esos proyectos.

2. Características de los conductores de hierro o acero galvanizado

Se conoce como galvanizado el proceso de provocar que se deposite sobre las superficies del hierro o el acero una cubierta formada por una aleación hierro-cinc, mediante la inmersión del

material en un baño de cinc fundido. Se logra de esta forma un material con una mayor resistencia superficial a la corrosión. El galvanizado da una protección electroquímica de sacrificio al hierro que impide su oxidación. El espesor de la capa de cinc depende de la temperatura del baño y del tiempo de inmersión. Pueden obtenerse capas más delgadas y flexibles usando un baño de cinc con 0.2% de aluminio.

Los conductores de hierro y sus aleaciones deben siempre tener alguna protección contra los efectos del medio ambiente, para lo que el galvanizado es una excelente opción. En gran parte, la corrosión es el resultado de la oxidación atmosférica directa de una superficie metálica. El galvanizado suministra la mejor resistencia a la corrosión atmosférica entre todos los métodos comerciales disponibles.

Las características eléctricas y de resistencia mecánica de los alambres y cables de hierro galvanizado existentes en el mercado varían considerablemente entre los diferentes fabricantes. Se estima además que, probablemente, entre productos de un mismo fabricante se puedan presentar diferencias apreciables, aun cuando sean del mismo calibre. Sin embargo, se han venido utilizando los datos que dan algunos manuales de ingeniería, los que han dado resultados aceptables, por lo que, mientras no se tenga información más confiable, se está recomendando seguir dicha práctica, pero se deben tomar las precauciones necesarias para evitar variaciones inconvenientes en el voltaje al final de la línea. Esta condición puede llevar en muchos casos a situaciones de sobrediseño, lo que debe ser tomado en cuenta por el proyectista.

En la tabla No 1 (al final del artículo) se presentan los datos de esfuerzo a la ruptura y resistencia en corriente directa para algunos tipos de acero galvanizado, que han sido usados con resultados aceptables en varios cálculos de caída de tensión para conductores de acero o hierro galvanizado. No se ha comprobado la utilización de esos datos para el cálculo de la resistencia mecánica; sin embargo, no se supone que los resultados sean aceptables en la misma proporción ya que puede esperarse en ellos una variación más amplia.

Si bien los datos de la Tabla No 1 (al final del artículo) pueden usarse con bastante precisión para calcular la resistencia a corriente directa, se debe proceder con cautela al calcular los valores de la resistencia a corriente alterna. El aumento en el valor de la resistencia efectiva a corriente alterna depende fundamentalmente de la permeabilidad del material ferromagnético; hay además un incremento adicional, de mucho menor magnitud, debido a la histéresis. La permeabilidad es sumamente sensible a variaciones en la composición, tratamientos térmicos y trabajo mecánico del metal; por esta razón no es factible calcular con precisión el efecto de piel, en forma general, para todos los conductores de hierro galvanizado, tal como se acostumbra hacer para los conductores de cobre o aluminio.

Cuando una corriente eléctrica circula a través de un conductor se produce dentro y alrededor de él un campo magnético, de acuerdo con lo que expresa la ley de Biot y Savart para conductores rectilíneos largos, el cual será siempre perpendicular a la dirección de la corriente y simultáneamente también perpendicular al radio del conductor. O sea que las líneas de flujo forman círculos concéntricos alrededor del centro del conductor. Este campo tiene, entre otros, el efecto de oponerse a las variaciones en la magnitud de la corriente, de acuerdo con la ley de Lenz, y en su intento le dificulta a la misma circular por la zona interna del conductor, donde su efecto es más sensible. Esto provoca que la densidad de corriente no tenga el mismo valor para los diferentes puntos del conductor, siendo mayor cerca de la periferia y menor hacia el centro del conductor. A este fenómeno se le denomina efecto de piel, nombre que adopta debido a que la corriente tiende a circular por los puntos cercanos a la superficie del conductor, haciendo que el área efectiva a través de la que debe circular la corriente sea menor, aumentando por lo tanto la resistencia eléctrica del conductor. Este fenómeno será más acentuado conforme aumenta el diámetro del conductor y la frecuencia de la corriente eléctrica.

Si el conductor está hecho de un material no-magnético, como el cobre o el aluminio, que son los materiales más usados para fabricar conductores eléctricos, el efecto del campo magnético sobre la resistencia será fácilmente

predecible, existiendo formas de calcularlo con precisión, dependiendo únicamente de la frecuencia de la corriente eléctrica y el diámetro del conductor, además de que se puede encontrar su valor aproximado en tablas. Los materiales llamados ferromagnéticos, por lo contrario, reaccionan con el campo magnético reforzándolo considerablemente. Por lo tanto no debe causar sorpresa que el aumento en la resistencia sea mucho mayor que el que se produce en los conductores no-magnéticos.

Como se mencionó antes, la permeabilidad magnética depende no solo de la composición química del material sino, además, de los tratamientos térmicos y trabajo mecánico que el material haya sufrido durante y después de su fabricación. Los datos experimentales que se han obtenido (Ref. [3] y [4]) dan factores de conversión de resistencia de corriente directa a resistencia de corriente alterna, a una frecuencia de la corriente de 60 hertz, que pueden ser tan bajos como 1,15, pero pueden llegar a valores de 2,50 o más. En la práctica, a falta de valores más confiables, se ha venido utilizando un factor de conversión de 2,0, que ha producido resultados aceptables en los casos en que hasta ahora se ha utilizado.

Por otro lado, por existir un campo magnético alterno dentro del material ferromagnético, se produce un lazo de histéresis, el cual se debe a irreversibilidades presentes en el ciclo magnético, las que provocan disipación de energía que debe ser suministrada por la corriente eléctrica, todo lo cual queda reflejado como un incremento en la resistencia del conductor. A pesar de todo, las pérdidas debidas a la histéresis son pequeñas comparadas con las demás pérdidas debidas a la magnetización del material, por lo que no se entrará a analizar más dicho efecto en este artículo.

3. Comparación de un cable de acero con el cable ACSR

En la tabla No 2 (al final del artículo), se hace una comparación entre el cable de acero galvanizado No 8 BWG, con el cable ACSR No 6, que se considera el más utilizado en proyectos de este tipo. Puede notarse que el esfuerzo a la ruptura es muy similar entre ambos, no así la resistencia

eléctrica del conductor por unidad de longitud. Por otro lado, se nota que la resistencia eléctrica que se detecta en corriente directa para este cable de acero galvanizado es considerablemente mayor que la que se detecta para el mismo en corriente alterna, a la frecuencia usual en Costa Rica de 60 hertz. Para el cable de acero la resistencia en corriente alterna resulta ser más del doble de la que se presenta en corriente alterna ya que el aumento según los valores indicados en la tabla No 2 (al final del artículo) es de 112%, mientras que el aumento en la resistencia del cable ACSR es de menos del 1,5%, para las mismas condiciones. Si se une el aumento en la resistencia debido al cambio de material en el cable, con el aumento a causa del efecto de la frecuencia sobre el material magnético, para el caso particular de esta comparación, la resistencia a la frecuencia de trabajo es aproximadamente 12,5 veces mayor con el cable de acero galvanizado comparado, con el cable No 6 ACSR. Esta condición refuerza la hipótesis de que el uso de conductores de hierro y sus aleaciones está limitado a distancias de transmisión muy cortas.

El cable ACSR es fácilmente localizable en el mercado ya que es ampliamente utilizado por los contratistas que se dedican a la instalación de líneas eléctricas. El cable de acero galvanizado, similar al tipo BB, mencionado en la tabla No 2 (al final del artículo), no fue posible encontrarlo en el mercado nacional. Se usa, sin embargo, como referencia para efectos de comparación en dicha tabla. Como no es corriente el uso del cable de hierro galvanizado como conductor, no fue posible localizar ninguno disponible en el mercado, del que, simultáneamente, se pudieran encontrar sus datos en las tablas. El precio que se indica en la tabla es por lo tanto una estimación basada en el de otros cables de acero similares.

4. Descripción de una experiencia práctica

Con el fin de aclarar un poco más las posibilidades de utilizar los conductores de hierro galvanizado, se describe a continuación un trabajo realizado, en el que se recomendó la utilización de cable de acero galvanizado. En la tabla 3 (al final del artículo) se dan las características del proyecto.

Se consiguieron para este proyecto dos transformadores, usados, de 5 KVA cada uno, 4160/120-240 voltios, que habían sido descartados del sistema de la Compañía Nacional de Fuerza y Luz, debido a la decisión tomada por la compañía de servicios eléctricos de elevar su voltaje de distribución. El voltaje de 4.160 voltios, aunque ampliamente usado en San José hace algunos años, está hoy día prácticamente en desuso. Esta disponibilidad de transformadores, a un precio muy conveniente, determinó el voltaje a utilizar en el proyecto. Se utilizaría uno de los transformadores como estación elevadora y el otro como estación reductora. Además, para regular el voltaje, cada transformador disponía de 5 pasos de salida, lo que permitía regular el voltaje 5% hacia arriba y 5% hacia abajo del voltaje nominal, en pasos de 2,5%. Esta facilidad se utilizó para lograr las mejores condiciones de voltaje en la carga, una vez construido el sistema. En la fotografía # 1 se presenta el poste que contiene el transformador elevador de voltaje.

Los aisladores para 4.160 voltios se consiguieron fácilmente, en su momento, en las ferreterías. Los postes fueron construidos de material disponible en la zona en la que se instaló el proyecto. En las figuras 2 y 3 se presentan dos vistas generales de la línea de transmisión construida.

El cable de acero galvanizado al que se tuvo acceso tenía características físicas similares al No 8 descrito en la Tabla No 2 (al final del artículo), aunque no se disponía de más información sobre él. Se tomó la decisión de utilizar los datos disponibles ahí para proceder al diseño de la línea de transmisión ya que no era posible conseguir más información sobre el cable galvanizado y las posibilidades económicas del proyecto no permitían el uso del cable ACSR.

Se obtuvieron con esto las características de la tabla 4 (al final del artículo).

De donde puede observarse que en la línea de transmisión se produce una caída de tensión máxima de menos del 0,5% del voltaje nominal, la cual es mucho menor que el 3% que recomienda el Código Eléctrico Nacional [Ref. 6] para la caída total en los alimentadores, dejando suficiente

margen para tomar en cuenta la caída de voltaje en los transformadores y el resto del sistema.

El sistema mencionado aquí fue construido y puesto en funcionamiento en 1982, con resultados satisfactorios desde el punto de vista eléctrico. Se presentaron problemas de resistencia mecánica del material ya que el cable utilizado inicialmente sufrió problemas de deformación plástica, lo que llevó a la necesidad de cambiarlo en varias oportunidades, hasta que finalmente, en 1986, se encontró un cable tipo ACSR, que se consiguió a buen precio por ser usado.

Sin embargo, el cable mencionado no alcanzó para sustituir todo el cable por lo que todavía funciona una sección con cable galvanizado. El trabajo fue útil para demostrar la posibilidad de utilizar conductores de materiales ferromagnéticos, ya que el cambio de conductor no tuvo un efecto apreciable sobre el voltaje final, tal como era esperable de acuerdo con los valores de diseño indicados antes. Aún cuando la caída de voltaje en el cable de ACSR debió ser comparativamente mucho menor que con el cable anterior, las otras caídas de tensión en el resto del sistema eran de mayor importancia que la caída en el cable.

La línea de transmisión mencionada en este artículo, con las modificaciones indicadas, continúa funcionando en la actualidad. En la fotografía # 4 se muestran los cables utilizados, donde se puede distinguir un cable de aluminio en la parte inferior y un cable galvanizado en la parte superior. Puede notarse el deterioro sufrido por el cable galvanizado, el cual se nota que se ha oxidado debido a la desaparición de la capa de galvanizado.

5. Conclusiones y recomendaciones

Se han tenido serias dificultades para encontrar las características eléctricas y mecánicas de los cables de acero galvanizado disponibles en el mercado costarricense ya que las empresas que los venden no disponen de esa información. Se recomienda por lo tanto buscar la forma de tener acceso a ella, ya sea insistiendo ante los

fabricantes, o tratando de determinarlas experimentalmente.

Se ha demostrado, en al menos un caso práctico, descrito en el presente trabajo, la posibilidad, técnica y económica, de utilizar los conductores de acero galvanizado en las líneas de transmisión asociadas a proyectos de minicentrales hidroeléctricas. Se tiene conocimiento de algunos otros casos en el país de utilización de este tipo de conductores para extender acometidas eléctricas después de la medición del usuario, que no se consideró necesario explicar aquí más ampliamente.

Se demostró que la caída de tensión que se produce con conductores de cable de acero galvanizado puede ser aceptable para líneas muy cortas, no más de unos pocos kilómetros de longitud de línea. Deben tomarse en cuenta los diferentes calibres de cables galvanizados disponibles en el mercado, con el fin de utilizar el que mejor se adapte a la caída de voltaje recomendable y que sea la mejor solución desde el punto de vista económico.

El costo del cable de acero galvanizado es muy bajo comparado con cualquiera de los conductores eléctricos tradicionales, lo cual lo hace competitivo para ser usado en proyectos de minicentrales hidroeléctricas, siempre que las condiciones de caída de voltaje lo permitan.

Se debe procurar utilizar cable de acero galvanizado de aceptables condiciones de esfuerzo a la ruptura y a la deformación, evitando su uso cuando no se dispone de información sobre sus características eléctricas y mecánicas. Es importante también en este sentido revisar la calidad del galvanizado.

Se ha encontrado que el mismo se deteriora muy rápidamente en las condiciones ambientales imperantes en la zona del proyecto descrito en este artículo, siendo probable que la misma situación, con pequeñas variaciones, se presente en el resto del país.

Bibliografía

1. Clark D.S. y Varney W.R. Physical Metallurgy for Engineers. 2a Ed., American Book Company: USA. 1969.
2. Enríquez H.G. El ABC de las Máquinas Eléctricas. 1a Ed., Editorial Limusa: México. 1992.
3. Fink G.F. y Carrol J.M. Standard Handbook for Electrical Engineers. 10a Ed., McGraw-Hill Book Company: New York, USA, 1968.
4. Gourishankar V. Conversión Electromecánica de Energía. 2a Ed., International Textbook Co.: México. 1990.
5. Higgins R.A. Ingeniería Metalúrgica. 3a impresión. Compañía Editorial Continental S.A. México. 1976.
6. National Fire Protection Association. National Electrical Code. Boston, USA, 1981.
7. Organización Latinoamericana de Energía, OLADE. Minicentrales Hidroeléctricas. Manual para toma de Decisiones. Quito, Ecuador, 1981.
8. Organización Latinoamericana de Energía, OLADE. Minicentrales Hidroeléctricas. Manual de Diseño. Lima, Perú, 1982.
9. Sears F.W., Zemansky M.W. y Young H.D. Física Universitaria. 6a Ed. en español, Addison-Wesley Iberoamericana, México, 1989.
10. Stevenson W.D. Elements of Power Systems Analysis. 3a Ed., McGraw-Hill Book Company: New York, USA, 1962.

Tabla No 1

ESFUERZO A LA RUPTURA Y RESISTENCIA EN CORRIENTE DIRECTA DEL ACERO GALVANIZADO*

Tamaño del conductor BWG	Diámetro del conductor mm	Area del conductor mm ²	Esfuerzo a la ruptura (EBB)** newtons	Esfuerzo a la ruptura (BB)** newtons	Resistencia C.D. 20°C (EBB)** Ohmios/100m	Resistencia C.D. 20°C (BB)** Ohmios/100m
4	6,048	28,70	9.021	10.097	0,390	0,436
6	5,158	20,89	6.561	7.340	0,536	0,600
8	4,193	13,79	4.337	4.849	0,808	0,907
9	3,761	11,10	3.492	3.914	1,01	1,13
10	3,405	9,10	2.869	3.203	1,23	1,38
11	3,049	7,30	2.291	2.558	1,53	1,72
12	2,770	6,02	1.890	2.113	1,86	2,08
14	2,109	3,49	1.099	1.223	3,21	3,59

* Datos tomados y adaptados del "Standard Handbook for Electrical Engineers", Fink & Carrol. 1968

** Designación ASTM: Extra Best Best (EBB), Best Best (BB)

Tabla No 2

DATOS COMPARATIVOS ENTRE EL CABLE ACSR No6 Y CABLE DE ACERO GALVANIZADO No8

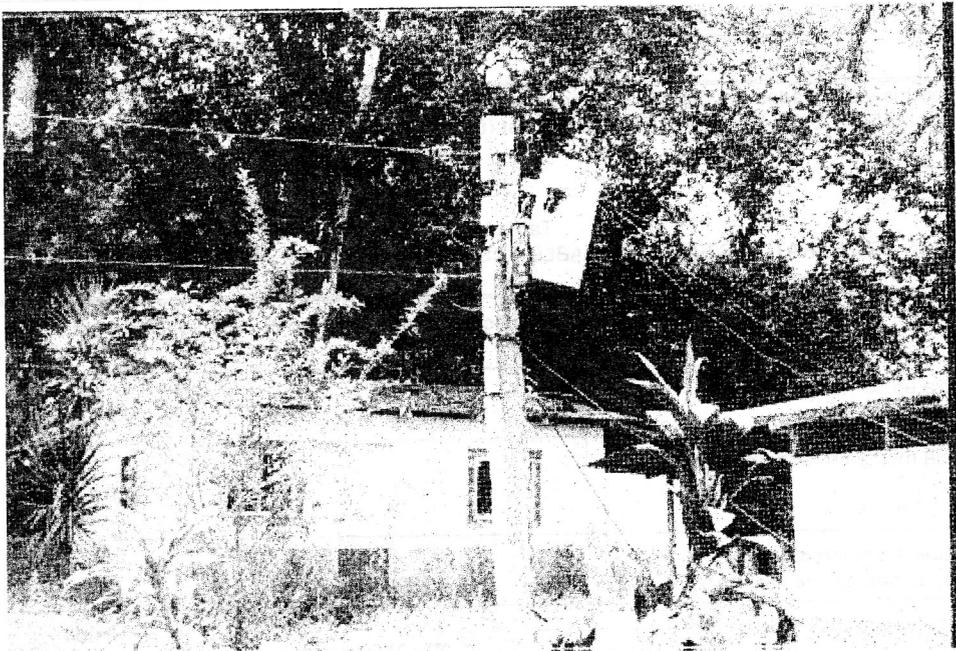
	Cable acero galvanizado, No 8 BWG	Cable ACSR, No 6
Resistencia en corriente directa. (ohmios/100m)	0,808	0,136
Resistencia media en corriente alterna-60 hertz. (ohmios/100m)	1,714	0,138
Costo actual estimado del cable (colones por metro, en colones de julio de 1994)	¢ 7,65	¢ 61,55
Esfuerzo estimado máximo a la ruptura (newtons)	4.337	5.204

Tabla No. 3

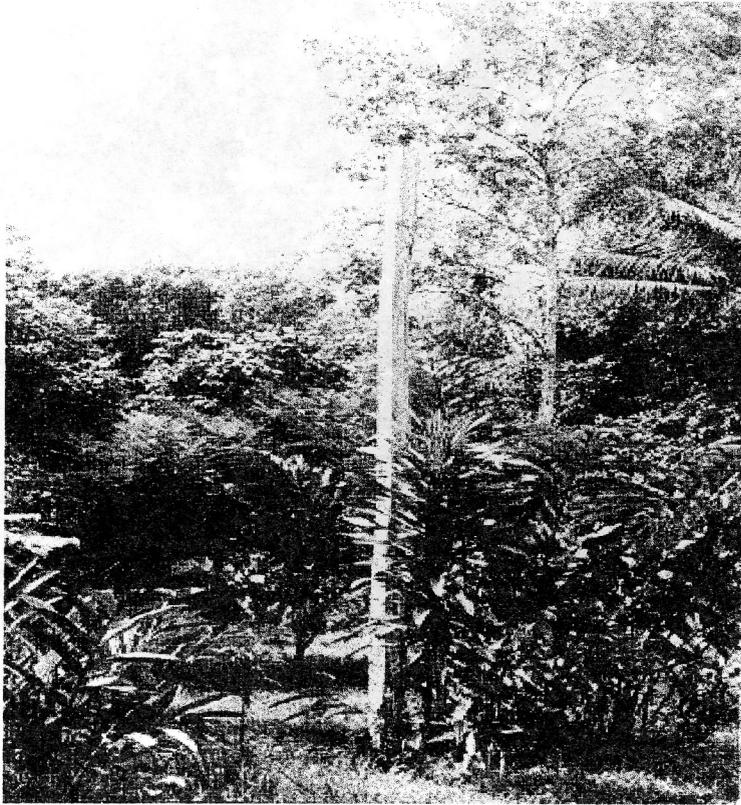
Ubicación del proyecto:	Puerto Viejo de Sarapiquí
Potencia máxima de consumo:	3.000 vatios
Voltaje recibido:	240 voltios
Voltaje necesario en la carga:	120-240 voltios
Voltaje de transmisión:	4.160 voltios
Capacidad de los transformadores:	5 KVA, 4160/120-240 voltios
Distancia entre la recepción y el punto de consumo:	800 metros

Tabla No. 4

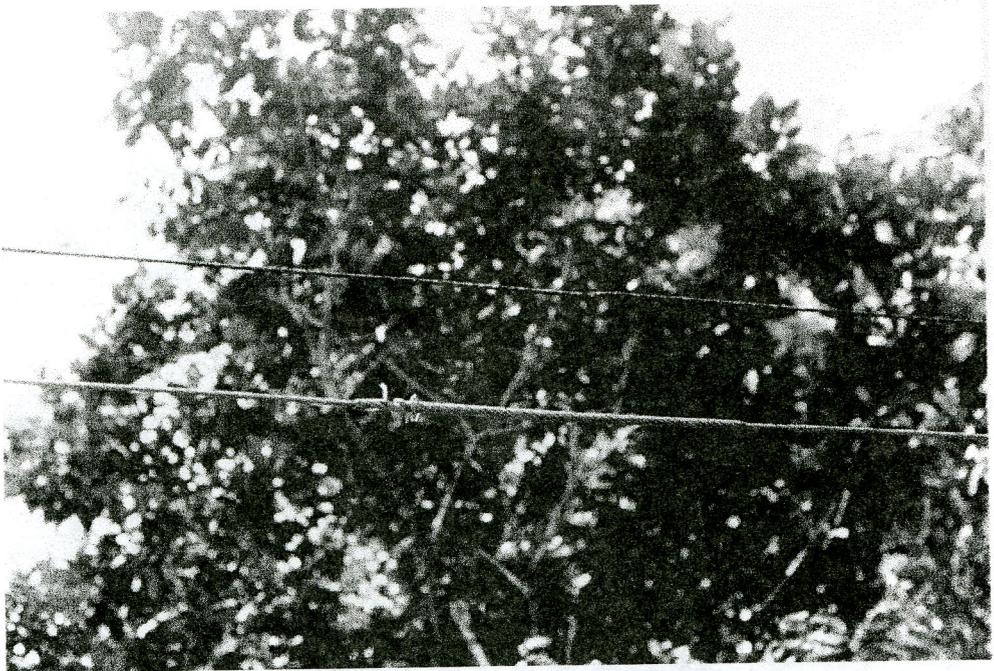
Longitud de la línea:	800 metros
Voltaje de transmisión:	4.160 voltios
Resistencia a 60 hertz:	0,01714 ohmios por metro
Resistencia total de la línea:	27,42 ohmios
Corriente eléctrica máxima:	0,721 amperios
Caída de voltaje en la línea:	19,77 voltios



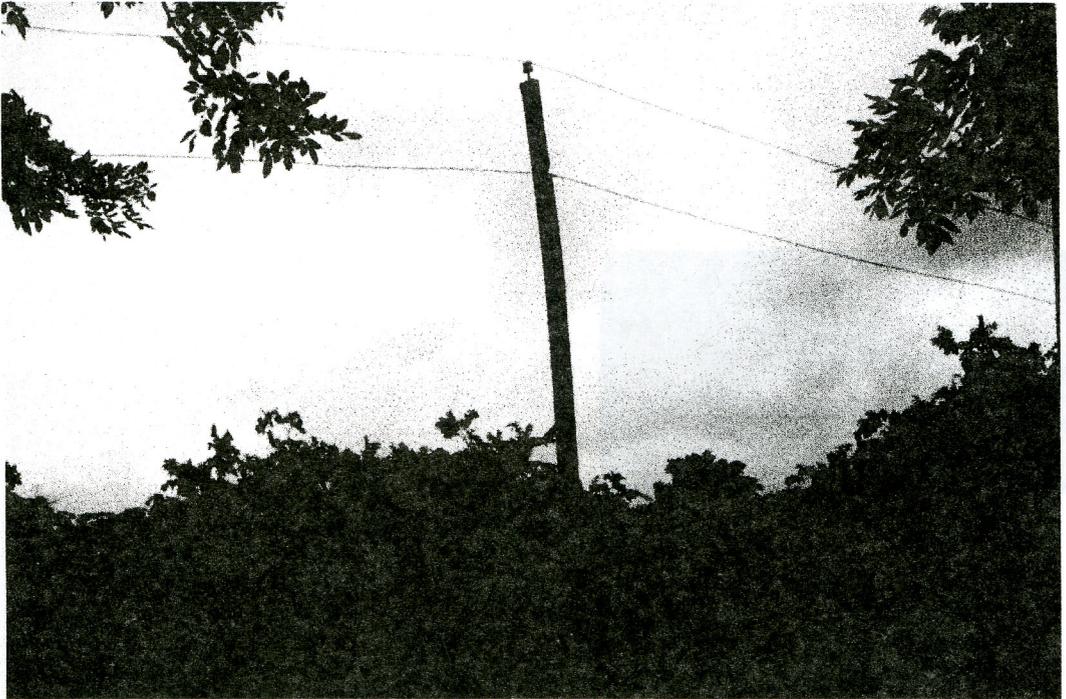
FOTOGRAFIA # 1 - Transformador elevador de voltaje



FOTOGRAFIA # 2 Vista general de la línea de transmisión



FOTOGRAFIA # 3 Vista general de la línea de transmisión



FOTOGRAFIA # 4 Detalle de los cables utilizados