

CALCULO MECANICO DE UNA LINEA DE TRANSMISION ASISTIDO POR COMPUTADOR

Raúl A. Canelos S.
Ingeniero Eléctrico
INECEL - Escuela Politécnica Nacional

Resumen

El propósito principal de este estudio es presentar un modelo matemático que contribuya a solucionar rápida y eficientemente los problemas de cálculo mecánico para el diseño de una línea de transmisión, y subtransmisión en torres metálicas, proporcionando al ingeniero una herramienta útil, que le permita a su vez ampliar su capacidad de profundizar sus criterios en los siguientes aspectos:

1. Ubicación de torres de transmisión y subtransmisión
2. Especificación de cargas de las estructuras
3. Tendido y flechado del conductor
4. Cálculo de capacidad térmica de los conductores

En otras palabras el programa computacional desarrollado resuelve los problemas de cálculo mecánico de una línea de transmisión.

Abstract

The main objective of this study is to present a mathematical model that helps to solve fast and efficiently the problems of mechanical calculations for transmission and subtransmission line design, providing to the designer a useful instrument, to widen the knowledge criteria in the following aspects:

1. Transmission and subtransmission position points
2. Specifications in structures forces
3. Sag tension computations
4. Conductor thermal capability

In other words this software solves the mechanical computational problems for transmission line design.

Introducción

Para el diseño de una línea de transmisión se deben considerar los siguientes puntos principales:

1. Selección y definición de la ruta
2. Selección y definición del conductor económico
3. Cálculo y dimensionamiento de las estructuras de soporte
4. Cálculo del flechado para todos los tramos de la ruta
5. Comprobación de las distancias de seguridad para cada trayecto en especial tramos con desnivel

6. Cálculo de la capacidad térmica del conductor
7. Cálculo de la catenaria del conductor para diferentes tramos de la ruta

Se hace indispensable entonces, contar con una herramienta que establezca con rapidez y exactitud los diferentes parámetros de diseño para una línea de transmisión. El programa es un libro Excel de varias hojas el mismo que calcula los puntos 3, 4, 5, 6 y 7, y adicionalmente ayuda considerablemente para tomar decisiones para la definición de la ruta es decir, para el punto 1.

2. Cálculo de la Catenaria del Conductor (Hoja 1)

Una vez definida la ruta, en la que se ha determinado los vértices es decir, los cambios de dirección de la línea de transmisión, y al haberse determinado el conductor por el que se transmitirá la potencia requerida es necesario proceder al cálculo de la catenaria o curva que presentará el conductor bajo ciertas condiciones eléctricas de carga, ambientales de temperatura, y condiciones mecánicas en las que influiría la topología misma del terreno por la que pasaría cada vano entre las estructuras de la línea.

El cálculo de la catenaria del conductor parte de la resolución de la ecuación de estado, la misma que describe el comportamiento del conductor para diferentes variables.

Dicha ecuación tiene su resolución en la tensión horizontal T , a la que se verá sometida la estructura de soporte y es así que siendo:

$$\Delta L = L_0 \alpha \Delta t \quad (\text{Efectos térmicos}) \quad (1)$$

$$E = \frac{T/A}{L_0 / \Delta L} \quad (\text{Efectos Mecánicos}) \quad (2)$$

Igualando ambas ecuaciones y planteando en función de la tensión, se tiene la ecuación de estado, la misma que se plantea en tercer grado, donde:

$$T^3 + T^2 k_1 + k_2 = 0 \quad (3)$$

y los coeficientes k_1 , k_2 dependen de las siguientes variables:

1. Conductor Tipo
2. % Tensión De Ruptura
3. Velocidad Viento
4. Vano Diseño
5. Temperatura Estado 0
6. Temperatura en Caliente
7. Tensión de Ruptura
8. Peso Unitario Conductor
9. Módulo Elasticidad Inicial
10. Módulo Elasticidad Final
11. Sección Conductor
12. Diámetro Conductor
13. Coeficiente de Dilatación Lineal

Todas las variables anteriormente descritas deben ingresar como datos al programa, sin embargo se lo ha diseñado de tal manera que las guarda en una base de datos y saca sus valores con en función de el nombre del conductor. Así si se indica que se desea correr el programa para el conductor "Flicker" o "Hawk" todos los parámetros de dicho conductor ingresan a los cálculos respectivos tal como se indica a continuación: (Gracias a la versatilidad de los programas bajo Windows se puede tomar partes del programa y presentar los resultados)

Tabla 1. Forma de Presentación de los Datos del Programa

			MN TEMP	MAX CARGA	EVERGEN
ZONA		1	5	18	80
CONDUCTOR TIPO		Hawk			
E.D.S.% TENSION DE RUPTURA	F	21	EFECTO VIENTO		
VELOCIDAD VIENTO km/h	VU	0	0.00	0.98	
VELOCIDAD MAXIMA VIENTO	VM	60	0.38	1.05	
VANO DISEÑO (ENTRE 300 -500 V		350			
TEMPERATURA ESTADO 0	T1	25			
TEMPERATURA EN CALIENTE	T2	60			
DELTA TEMPERATURA	t	35			
TENSION DE RUPTURA kg	TR	8810			
PESO UNITARIO kg/m	P0	0.975			
MOD ELASTICIDAD inicial kg/mm	Ei	5200			
MOD ELASTICIDAD final kg/mm ²	EF	7200			
SECCION mm ²	A	281.1			
DIAMETRO DEL CABLE mm	DC	21.8			
COEF DILATACION LINEAL 1/C	DL	0.0000196			
LIMITE DE VANOS					
LIMITE SUPERIOR	C1	1100			
LIMITE INFERIOR	C2	100			
INCREMENTO	C	50			

Tal como se ve en la Tabla 1 es la manera como presenta el programa los datos para los cálculos.

El usuario sólo debe llenar las casillas en color gris, lo demás se recoge de la base de datos. Uno de los datos de ingreso es la "zona", esto es debido a que en nuestro país se tiene la zona Costa u Oriente codificada como " 1 " y la zona Sierra codificada como " 2 ".

Para la resolución de la ecuación de estado se utiliza el método numérico de Newton - Raphson el mismo que consiste en realizar aproximaciones a través de la derivada de la ecuación, hasta establecer un valor de gran exactitud.

El cálculo se lo realiza a través de un programa del computación, que dependiendo de los valores de cada

una de las variables resuelve rápidamente y encuentra la solución requerida para el caso solicitado. Como se utiliza el programa Excel la resolución de la ecuación de estado se lo realiza mediante el lenguaje Visual Basic.

Se calcula la catenaria y las tensiones horizontales o transversales para cuatro estados básicos:

1. Conductor frío temperatura ambiente (5 °C en la Costa o -5°C Sierra) y viento mínimo.
2. Conductor a temperatura ambiente (18 °C Costa o 5° Sierra) y viento a máxima carga.
3. Conductor caliente, a 60 °C de temperatura, con viento mínimo.
4. Conductor en emergencia a 80 °C de temperatura viento mínimo.

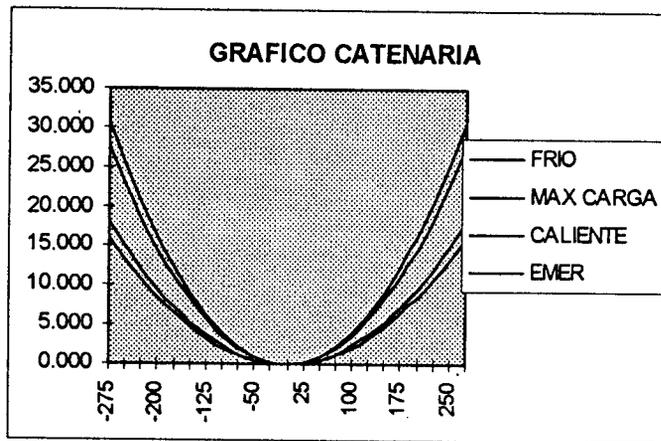


Figura 1 Gráfico de la Catenaria

Luego se procede a calcular el parámetro para el cual se diseña la línea de transmisión el mismo que determinará la geometría para el vano de diseño y que se lo puede considerar constante para el trayecto total de la línea.

De todas maneras, con el avance de los programas de computación, no hay ningún problema en obtener los valores de tensión horizontal o la geometría de la línea para cualquier vano o condición de temperatura, en un punto específico de la misma como se muestra en las tablas de tendido o flechado.

El objetivo de esta primera hoja de cálculo no es solamente determinar la catenaria del conductor sino también calcular las tensiones máximas que tendrían que soportar las estructuras, para diferentes condiciones de máxima carga, conductor frío y transmisión en emergencia, dichas tensiones pasan automáticamente sus valores a la Hoja 2, la misma que con el ingreso de estos cálculos y con los respectivos factores de seguridad procede a su respectivo cálculo.

3. Cálculo de las Cargas Mecánicas en Las Diferentes Estructuras (Hojas 2 - 6)

Para INECEL existen cinco tipos principales de estructuras a saber:

1. Estructuras de suspensión liviana para trayectos rectos y ángulos máximos de hasta 0.5° ,
2. Estructuras de suspensión pesada para ángulos máximos de hasta 7° ,
3. Estructuras de anclaje liviano para ángulos máximos de hasta 25° y pendientes de bajo porcentaje,
4. Estructuras de anclaje y remate para ángulos máximos de hasta 50° y pendientes de alto porcentaje, y,

5. Estructuras terminales o dead end para torres con vanos fuertes a un lado y vano flojo (frente a subestaciones) en el otro.

El programa calcula las máximas tensiones a las que se verían sometidas las estructuras en función de las máximas flechas, velocidad del viento y obviamente de las características mecánicas del conductor tomando en cuenta además los cuatro estados básicos descritos anteriormente en el punto 2 y de cada uno de ellos el programa tomará los valores necesarios para obtener las cargas que deberán soportar las estructuras en los casos extremos.

3.1 Cálculo y Dimensionamiento de las Estructuras de Soporte

Acorde a las normas norteamericanas de diseño de las líneas de transmisión, Guide For Design Of Steel Transmission Towers de la American Society of Civil Engineers, éstas deben dimensionarse para soportar las máximas cargas posibles, las mismas que se las calcula en base a situaciones o hipótesis que podrían presentarse a lo largo de la vida útil de la línea. Se han clasificado en cuatro hipótesis principales :

1. Hipótesis de carga de viento extremo o máximo, al cual se lo analiza para tres direcciones respecto a la línea a 90° , 45° y 0° .
2. Hipótesis de sobrecarga vertical con viento de presión $\frac{1}{4}$ de igual forma se lo analiza para tres direcciones respecto a la de la línea a 90° , 45° y 0° .
3. Hipótesis de rotura de conductor con viento de presión $\frac{1}{4}$ y de igual forma a 90° , 45° y 0° .
4. Hipótesis de desequilibrio longitudinal con viento a $\frac{1}{2}$ presión y ángulo de 0° y 90° .

Adicionalmente habría una hipótesis de armado para la cual las estructuras deben soportar cargas de 150 y 200 kg en los puntos de las crucetas.

Las cargas de las estructuras para todas las hipótesis se dividen en :

a) Cargas Verticales .- Las mismas que son función de los siguientes parámetros:

- Peso del conductor
- Peso de la cadena de aisladores y accesorios (amortiguadores)
- Vano Peso

b) Cargas Transversales.- Para estas cargas se deben considerar las siguientes variables:

- Velocidad del viento de diseño (preferible entre 60 y 90 km/h)
- Características geométricas del conductor (sección, área)
- Angulo máximo del conductor (1/2° para suspensión, 7° suspensión pesada, 50° Anclaje y remate, 15° Torre terminal).
- Tensión en la cadena de aisladores.

c) Cargas Longitudinales.- Estas cargas dependen de:

- Velocidad del viento de diseño (preferible entre 60 y 90 km/h)
- Características geométricas del conductor (sección, área)
- Dimensión de la flecha
- Tensión en la cadena de aisladores

Para todas las hipótesis el programa calcula todas las cargas de todos los tipos de estructuras ; y dibuja el "árbol de cargas" el cual es un resumen gráfico de las tensiones resultantes para las peores condiciones de soporte.

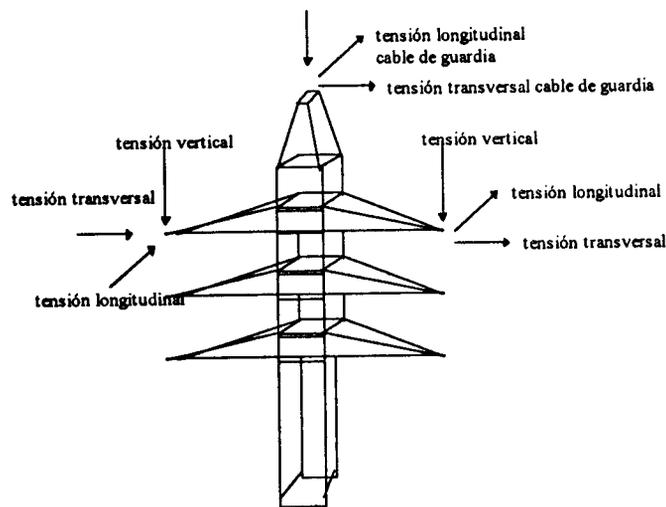


Figura 2. Arbol de Cargas de una Estructura

En la figura 2 se indica como presenta el programa las tensiones en los puntos extremos de las crucetas:

El libro Excel de cálculo se ha dividido en varias hojas, una por estructura, para la presentación cómoda del usuario, con el objeto de facilitar la lectura de las cargas.

A continuación se presenta el resultado para una de las hipótesis en una estructura de suspensión liviana.

Tabla 2. Valores de Carga Sobre una Estructura para Diferentes Valores de Ángulo de Viento.

HIPOTESIS 1 SOBRECARGA DE VIENTO MAX

		ANGULO VIENTO		
		90°	45°	0°
VERTICAL CONDUCTOR	VC	834	834	834
VERTICAL H.S.	VCg	298	298	298
TRANSVERSAL AISL	TCad	11	11	11
TRANSVERSAL CONDUCTOR	TC	295	223	50
TRANSVERSAL H.S.	TCg	122	94	27
LONGITUDINAL CONDUCTOR	LC	0	0	36
LONGITUDINAL H.S.	LCg	0	0	9

CONDICION 1 A VIENTO MAX 90°

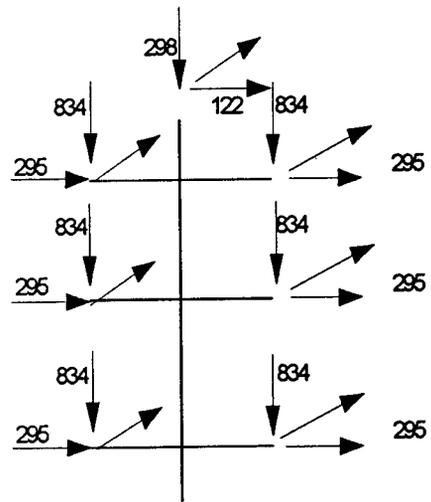


Figura 3. Arbol de Cargas para Condición de Viento Máximo

Así presenta el programa los cálculos para la hipótesis de carga para viento máximo y a su vez presenta el árbol de carga para la peor condición de esta hipótesis. Las tensiones indicadas están en kg.

4. Ubicación (Hoja 7)

Esta hoja es prácticamente elaborada en su totalidad por el usuario, en la cual se colocan todos los datos de las cotas y abscisas de cada torre que el proyectista determina que deben ir ubicadas las estructuras.

En esta hoja el programa solamente va calculando la longitud de los diferentes vanos y la diferencia en las cotas.

5. Calculo del Flechado (Hoja 8)

El programa toma los datos de las tablas de ubicación, calcula las flechas de cada vano, se lo asume para las temperaturas entre 10 °C y 22 °C en la zona Sierra y de 14 °C a 32 °C , que son las temperaturas a las que se tendería el cable en la Costa, el intervalo es de 2 °C, con el objeto de dar una mayor exactitud antes de el engrape del cable a las respectivas estructuras de soporte.

Se ha considerado el vano regulador para cada tramo de la línea entre estructuras de anclaje y remate, de tal

forma que el cálculo del flechado sea lo más exacto posible.

Obviamente para el cálculo de la tensión transversal o vertical se emplea la ecuación de estado del conductor, lo que garantiza un valor de flecha modelado con la realidad.

A continuación se presenta un ejemplo de la forma como presenta el programa el calculo del flechado para tres estructuras de una línea:

Tabla 3. Valores de Flechado para las Estructuras: 18, 19, 20, 21 y 22 con Vano Regulador de 183 m y sus Respetivos Valores de Tensión de Flechado.

							VANOS REGULADOR									
							183.1									
							TEMPERATURA									
							10	12	14	16	18	20	22	24	26	28
							TENSION									
TRAMO ESTRUCTURA	DE	TRAMO ESTRUCTURA	DE	TRAMO ESTRUCTURA	DE	TRAMO ESTRUCTURA	2263	2212	2162	2114	2067	2021	1976	1933	1890	1850
NUM	TIPO	BSCIS	COTA	APA	VANO	D NIV										
17	AR	2007	-10.7	13.5	135	3.17										
18	SL	2207	-10.4	11.4	200	0.31	2.1	2.1	2.1	2.3	2.3	2.4	2.5	2.6	2.6	2.7
19	SL	2407	-8.65	11.4	200	1.71	2.1	2.1	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.6	2.7
20	SL	2543	-7.76	11.4	135	0.89	0.9	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2
21	SL	2726	-6.86	11.4	183	0.9	1.7	1.8	1.8	1.9	1.9	2.0	2.1	2.1	2.2	2.3
22	AR	2900	-1.08	13.5	175	5.78	1.6	1.6	1.6	1.7	1.8	1.8	1.9	2.0	2.0	2.1

6. Comprobación de las Distancias de Seguridad (Hoja 9)

Para cada trayecto, en especial tramos con desnivel, el programa puede calcular y dibujar la catenaria del conductor y se puede visualizar de esta manera si se van a cumplir los requerimientos de distancias mínimas de seguridad, o en su defecto si el tramo de línea es muy difícil, se puede observar si la ubicación de la estructura es correcta o no.

El proyectista de la línea podrá entonces decidir una mejor ubicación de la misma. Al trabajar el programa con la ecuación de estado, el gráfico de la curva del conductor resulta lo más próximo a la realidad, constituyéndose esta hoja de cálculo de una gran utilidad para el diseño. Así se puede ver los resultados que entrega el programa en la Figura 3 y en la Tabla 4

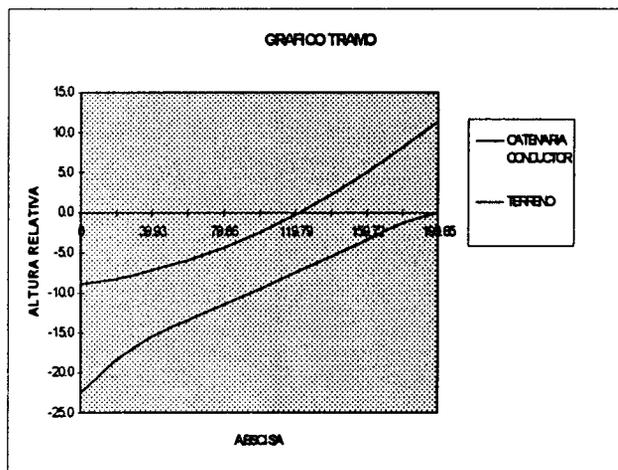


Figura 3. Gráfico de un Tramo de la Línea de Transmisión y Comprobación de Distancias

Tabla 4. Datos Correspondientes al Terreno donde se Ubican las Estructuras Correspondiente a la Figura 3

DAOS TERNO

DISTANCIA X	COTA ONDUCTO	COTA TERRENO	DIST RELATIVA	CATENARIA CONDUCTOR	TERRENO
1247.191	74.52	61.02	0	-8.9	-22.5
1247.2	75.24	65	19.985	-8.2	-18.5
1247.1	76.25	68	39.93	-7.2	-15.5
1247.1	77.56	70	59.885	-5.9	-13.5
1251.1	79.16	72	79.85	-4.3	-11.5
1257.0	81.04	74	99.825	-2.4	-9.5
1257.0	83.23	75	119.79	-0.2	-7.5
1256.9	85.70	76	139.755	2.2	-6.5
1256.9	88.46	80	159.72	5.0	-3.5
1261.9	91.52	82	179.685	8.1	-1.5
1263.8	94.87	83.47	199.65	11.4	0.0

Como se puede ver en la curva de la Figura 3 se ha dibujado la catenaria correspondiente a un conductor Hawk para un vano de aproximadamente 200 m.

Tabla No 5 Cálculo de la Capacidad Térmica de un Conductor Flicker con un Nivel de Voltaje de 230 kV.

INGRESO DE DATOS				CALCULO DE LA CAPACIDAD TERMICA SEGUN ALCOA			
ZONA	1			CALCULOS			
CONDUCTOR (nombre)	FLICKER			Cálculo de Tf temperatura película de aire			
Nivel de tensión de transmisión	230			36			
Velocidad del viento (pies/ seg)	2			CALCULO SIN VIENTO			
Temperatura ambiente Ta (g centígrados)	12			W/pla			
Temperatura conductor Tc (g centígrados)	60.0			W/m			
Máxima resistencia a 20 g C (ohms/1000pies)	0.036			Natural convection heat loss qc sea level			
Diámetro del conductor (pulg)	0.846			Natural convection heat loss qc high altitudes			
DATOS DE LA TABLA 6-5A				CALCULO CON VIENTO			
Densidad del aire pf	0.0608			Forced convection heat loss qc			
Viscosidad absoluta uf	0.0515			Radiated high loss qr			
Conductividad del aire kf	0.00943			Solar heat gain qs			
DATOS DE LA TABLA 6-6B				RESULTADOS nivel del mar			
Cantidad de calor recibida por el sol Qc	96.4			CON VIENTO SIN VIENTO			
Coeficiente de emisividad e =				CORRIENTE A LIMITE TERMICO I (amp) =			
Coeficiente de absorción solar a =				POTENCIA DE TRANSMISION (MVA)			
ANGULOS DE INCIDENCIA				CORRIENTE A MAS DE 3000 m			
Angulo del sol grados				Forced convection heat loss qc			
Angulo de línea grados				Radiated high loss qr			
Altitud del sol grados				Solar heat gain qs			
Angulo efectivo de incidencia				RESULTADOS 3000 m			
Resistencia del conductor a delta t				CORRIENTE A LIMITE TERMICO I (amp) =			
				POTENCIA DE TRANSMISION (MVA)			

9. Conclusiones

El programa abarca la mayor parte de cálculos mecánicos de una línea de transmisión. Los resultados obtenidos para múltiples aplicaciones han sido satisfactorios, y sería muy largo enumerar los proyectos donde se han aplicado los diferentes tipos de cálculo.

En otra parte de la hoja de cálculo se puede obtener el valor de la cota para cualquier punto de la catenaria.

8. Cálculo de la Capacidad Térmica del Conductor (Hoja 10)

El programa también calcula la capacidad térmica del conductor la misma que es función de varias variables tales como: diámetro y tipo del conductor, Voltaje de transmisión, la velocidad del viento, incidencia de rayos solares, temperatura ambiente, temperatura de trabajo del conductor, etc. las mismas que son llenadas por el usuario y acorde a las condiciones de trabajo, se entrega la máxima capacidad de transmisión tanto a nivel del mar como a 3000 msnm. En la tabla No 5 se resume un ejemplo de cálculo.

Se dispone de una herramienta rápida, y eficiente para los cálculos mecánicos necesarios para elaborar un proyecto de transmisión y/o subtransmisión.

Dichos cálculos se entregan a la respectiva área de diseño de soporte estructural para las líneas de transmisión.

10. Referencias

Este programa es fruto de la experiencia del Departamento de líneas de transmisión de INECEL, los artículos en los que se ha basado el modelo matemático implementado son:

1. Arthur Shawen, *Redefined Method Calculates Sag and Clipping Offsets*, Transmission and Distribution, Octubre 1985.
2. Comittes on Electrical Transmission Structures Division, *Guide for Design of Steel Transmisssion Lines*, Septiembre 1986.
3. Paul Winkelman, *Sag Tension Computations and Field Measurments of BPA*, , AIEE .1960.
4. Nestor Castro, *Curso de Líneas de Transmisión para Profesionales*, Departamento Eléctrico ENDESA, Publicaciones Técnicas
5. W. H. Mc Adams, *Heat Transmission*, Mc Graw Hill Book Company, 1954

11. Biografía



El Ing. Raúl Canelos nace en Quito, sus estudios primarios los hace en la Escuela Espejo, secundarios en el Colegio Sebastián de Benalcázar, se gradúa en la Escuela Politécnica Nacional de Ingeniero Eléctrico en 1981. En 1986-1987 realiza un curso de especialización en el Instituto Técnico Montani de Fermo, Italia, en microprocesadores. Ha presentado varios trabajos de investigación para la Comisión de Integración Eléctrica Regional CIER en Brasil, Paraguay, y Chile. Ha trabajado desde la etapa de diseño en las Centrales de Agoyán (150 MW) 1982 -1985 y Paute Fase C (500 MW) 1988 - 1991. Fue Administrador técnico en el diseño de la Central Saymirín 1992 - 1995. Actualmente trabaja en el Departamento de Líneas de Transmisión de INECEL y es Profesor de Física del Instituto de Tecnólogos de la EPN.