

Optimización de la utilización de semiproductos de la industria siderúrgica

DENIS ZAMBRANO ORTIZ¹, DONIER JIMÉNEZ SÁNCHEZ², JOSÉ ARZOLA RUIZ²,
LEANDRO LÓPEZ RUBIRA² Y JOSÉ VARGAS AGÜERO³

RESUMEN

Del estudio de los trabajos previos existentes y de la aplicación de la metodología de análisis y síntesis de sistemas de ingeniería al problema de preparación y toma de decisiones de destino de hornadas, en la presente ponencia se realiza el modelado matemático conceptual y su descomposición en la tarea de selección de la combinación de opciones que satisface un criterio empresarial a partir de la generación de diferentes opciones por hornadas. Se elabora el modelado matemático para la generación de hornadas y se propone un procedimiento que permita generar opciones de utilización por las diferentes hornadas producidas minimizando un compromiso entre el exceso de propiedades entregadas y la probabilidad de asegurar su cumplimiento. A partir de los datos acumulados de ensayos mecánicos y utilizando técnicas de modelación estadística no lineal, se identifica los modelos que describen las propiedades mecánicas como función de la composición química y el diámetro de los perfiles para cada dos talleres de laminación y se elabora una función de aproximación para la estimación de la probabilidad de destino exitoso como función del valor de la variable estandarizada de la distribución normal asociada a las propiedades.

Palabras clave: hornadas; industria siderúrgica; propiedades mecánicas.

ABSTRACT

From the study of the existent previous works and of the application of the analysis and synthesis of engineering systems methodology to the preparing and making heat destinations decisions in the present report the conceptual mathematical modeling and it decomposition in the task of selection of the combination of options that satisfies a managerial criterion is carried out starting by the generation of different options of heats produced. The mathematical modeling for the generation of options of use of heats produced is elaborated and a procedure that allows to generate using options for the different produced heats minimizing a commitment between the excess of given properties and the probability of assuring his execution is elaborated. Starting from the mechanical essays data accumulated and using technical of nonlineal statistical modeling. The models that describe the mechanical properties as function of the chemical composition and of the diameter of the profiles for two concrete lamination shops are identified and an approach function for the estimation of the probability of successful destination as function of the value

¹ Universidad Técnica de Manabí, Ecuador

² Instituto José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba

³ Empresa siderúrgica “ANTILLANA DE ACERO”, La Habana, Cuba.

the standardized variable of the normal distribution associated to the properties is elaborated.

Keywords: batches; steel industry; mechanical properties.

INTRODUCCIÓN

El problema de la generación de opciones de destino se encuentra directamente relacionado con el problema general de selección óptima de materiales, el que ha sido estudiado por numerosos autores. En efecto, el problema de cuales hornadas han de ser utilizadas en determinados destinos del conjunto de hornadas en proceso constituye un problema de selección óptima de materiales.

MATERIALES Y MÉTODOS

En los trabajos *Materials Selection in Mechanical Design* y *Materials: Engineering, science, processing and design*, [5], [6] Ashby determina como mejores opciones de selección de materiales aquellas en las que se utiliza con mayor plenitud sus propiedades, es decir, aquellas en que se minimiza el exceso de propiedades, asegurando los valores requeridos de éstas para el cumplimiento de la designación de servicio.

A partir de los trabajos básicos de Ashby muchos autores han desarrollado ideas específicas para la solución de tareas concretas. Así, Bin, W. [7] utiliza técnicas de simulación para estudiar el comportamiento de materiales en estructuras, utilizando el criterio de minimizar el exceso de propiedades obtenidas por simulación con respecto a las requeridas en el diseño de la estructura.

Con posterioridad, Arzola utiliza en [2] esta misma idea para la generación y selección de opciones de destino de las palanquillas en proceso, logrando introducir en explotación en los años 86 - 96 un sistema automatizado encargado de generar opciones de destino, las que son seleccionadas por el personal de dirección de la calidad de las industrias siderúrgicas de Acero, ratificando o redestinando las hornadas una vez laminadas de acuerdo a los ensayos mecánicos por el sistema de Aceptación – Rechazo desarrollado con este fin.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El destino de hornadas es parte componente de la dirección general del proceso productivo de las empresas siderúrgicas, por lo que su estudio debe necesariamente realizarse a partir del estudio general de las tareas asociadas a la dirección de la producción [1].

En la figura 1 se muestra la jerarquía de tareas de toma de decisiones de la producción de las empresas industriales, obtenida como resultado de la aplicación de principios de descomposición de la tarea de dirección del proceso productivo

enunciado por primera vez en el libro Selección de Propuesta [1] partiendo de una perspectiva anual.

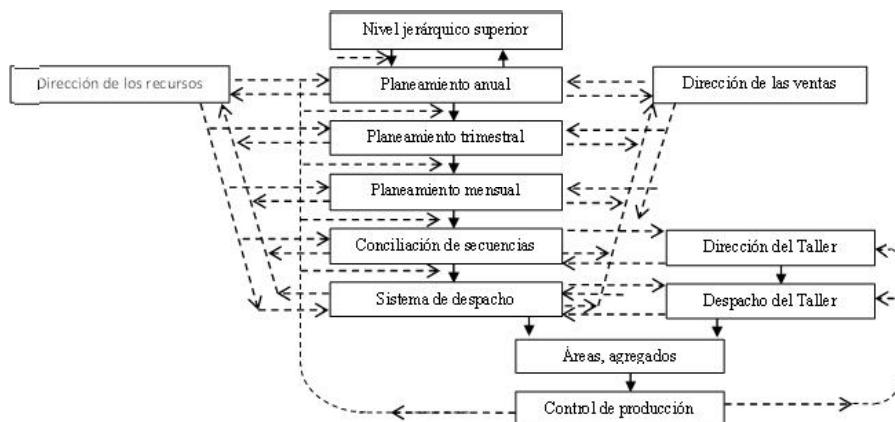


Fig. 1 Jerarquía de tareas de dirección de la producción industrial

Figura1. Jerarquía de tareas de dirección de la producción industrial

Del sistema de planeamiento anual se reciben las cifras pronósticos de producción para el año en curso, desglosadas por trimestres. El comportamiento real de los indicadores económicos y del mercado puede, y normalmente lo hace, condicionar la modificación de estas cifras durante el año, las que son desglosadas por trimestres y meses.

El nivel de toma de decisiones empresarial debe asegurar el balance de los flujos materiales entre los elementos de su descomposición espacial, en el tiempo. El hecho de que la demanda se precise, por lo general, en cada mes (y en ocasiones se rectifica varias veces durante el mes), impone la necesidad de elaborar mensualmente las secuencias de trabajo de los talleres y de rectificar, de forma periódica, estas secuencias durante el mes. Las secuencias deben ser compatibilizadas entre sí, ya que solo de esta forma se puede asegurar su viabilidad y el logro de un nivel adecuado de eficiencia general del sistema.

Las secuencias concretas que garantizan el cumplimiento de la tarea mensual de cada taller son emitidas, en calidad de propuestas, por los correspondientes sistemas locales de toma de decisiones. La selección de una combinación de secuencias se realiza en el nivel superior, por el sistema correspondiente. En la solución de las tareas señaladas, además de la consideración de los enlaces materiales, ocupa un lugar importante la consideración de los parámetros generados por el sistema de toma de decisiones de los recursos técnicos: máquinas o agregados en los que se debe fabricar determinado el tiempo (ejemplo 11.2 en el libro Sistemas de Ingeniería).

En el del trabajo [2] aparece la primera publicación nacional directamente relacionada con el tema de la presente Tesis, la que mantiene aún plena vigencia y sirvió de punto de partida de los trabajos subsiguientes. A continuación se da los

fundamentos sistémicos que sustentan las ideas principales de ese trabajo.

A partir de la carpeta de pedidos de los clientes, el Sistema de Dirección de la Producción elabora un plan de marcas. No obstante, las propiedades mecánicas del acero dependen no propiamente de la marca de acero fabricada sino de la composición química real obtenida [1, 3-8]. El subsistema de dirección de la producción encargado de la determinación del destino de las hornadas selecciona cuales hornadas van a satisfacer determinados pedidos y cuales permanecen almacenadas en espera de su destino definitivo.

Selección de hornadas

Estas decisiones se rectifican en cada ocasión que se requiere seleccionar hornadas por diferentes destinos. Algunas hornadas son seleccionadas para su laminación posterior, según la opción de destino y otras son almacenadas. Concluido el proceso de laminación según el destino asignado (Taller en el que se debe laminar, perfil del producto final y grado de calidad asignado) se obtiene la información sobre las propiedades mecánicas reales de ensayos mecánicos realizados a las probetas, el procesamiento de los cuales determina si se acepta o rechaza el destino previamente asignado, luego de lo cual se actualiza la información de los pedidos de la carpeta no satisfechos aún y el proceso se repite (figura 2).

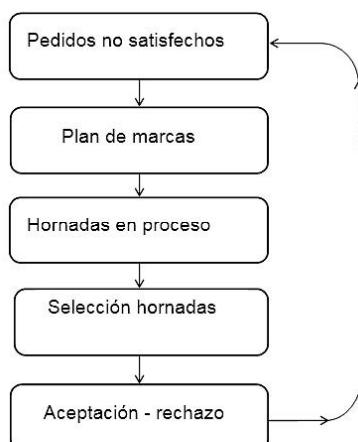


Figura 2. Esquema de preparación y toma de decisiones asociado al destino de las hornadas

Así, la utilización de los semiproductos en la industria siderúrgica, está estrechamente relacionada con las tareas del control de la calidad, de la dirección operativa de la producción y de la conducción de los procesos tecnológicos. En efecto, el sistema de control de la calidad no puede permitir que no se aseguren las propiedades del acero vendido y, al mismo tiempo, debe velar por la efectividad económica de la empresa.

Asimismo, el servicio de dirección de la producción puede verse en la necesidad de dar una inadecuada utilización, desde el punto de vista económico, al acero disponible para poder asegurar la materia prima necesaria para las partidas de producción de los laminadores finales.

Por otra parte, la conducción del proceso de fundición de acero puede facilitar o dificultar la correspondencia del acero disponible con el demandado por los talleres finales. La conducción del proceso en los talleres finales ayuda (o perjudica) a que las propiedades reales del acero se correspondan con el destino asignado [2].

De tal forma, la utilización racional del acero se asegura tanto por el Sistema Automatizado de Dirección Empresarial, como por los Sistemas Automatizados de Dirección de los Procesos Tecnológicos. La concepción general del sistema ocupado de la utilización del acero, a nivel empresarial, según se muestra en la figura 3.

Sobre la base de la composición química de la hornada recién producida se determinan, mediante la solución del modelo matemático correspondiente, diferentes opciones de destino; la información de la hornada en tránsito se incorpora al fichero de hornadas disponibles, el cual se nutre también del inventario de hornadas almacenadas.

Algunas hornadas son seleccionadas para su laminación posterior, según la opción de destino y otras son almacenadas. Luego de la laminación se obtiene la información sobre las propiedades mecánicas reales de determinadas muestras, el procesamiento de la cual determina el destino definitivo, se actualiza el inventario de palanquillas, se elabora el certificado de calidad, etc.



Figura 3. Concepción general del sistema de dirección de la utilización del acero

ANÁLISIS DE LA TAREA DE SELECCIÓN DE MATERIALES

Estudio del sistema de mayor envergadura

Según se estudia en la obra Sistemas de Ingeniería [2], la utilización racional, a partir

de la carpeta de pedidos de los clientes, el Sistema de Dirección de la Producción elabora un plan de marcas (figura 2). El subsistema de dirección de la producción encargado de la determinación del destino de las hornadas selecciona cuales hornadas van a satisfacer determinados pedidos y cuales permanecen almacenadas en espera de su destino definitivo. Estas decisiones se rectifican en cada ocasión que se requiere seleccionar hornadas por diferentes destinos. Algunas hornadas son seleccionadas para su laminación posterior, según la opción de destino y otras son almacenadas. Concluido el proceso de laminación según el destino asignado (taller en el que se debe laminar, perfil del producto final y grado de calidad asignado) se obtiene la información sobre las propiedades mecánicas reales de ensayos mecánicos realizados a las probetas, el procesamiento de los cuales determina si se acepta o rechaza el destino previamente asignado, luego de lo cual se actualiza la información de los pedidos de la carpeta no satisfechos aún y el proceso se repite (figura 2).

Análisis Externo

El análisis externo de la tarea objeto de estudio se establece como sigue:

VARIABLES DE COORDINACIÓN:

- Volúmenes de producción de perfiles con sus grados normados de calidad, para el periodo de tiempo asociado al umbral operativo de planificación (turno, día, semana), correspondientes a los pedidos a satisfacer, con toda la información asociada.

INDICADORES DE EFICIENCIA

- Exceso de costo asociado a la determinación de las hornadas asignadas por cada destino, la que se determina por la magnitud del exceso de propiedades con respecto a las normadas, entregadas a los clientes.

- Riesgo que se asume por la probabilidad de que el destino asignado sea rechazado por el sistema de aceptación – rechazo (clasificación de hornadas) una vez laminada, por las toneladas por las que en ese riesgo se incurre.

En efecto, el usuario utiliza el acero adquirido estrictamente por las propiedades normadas, por lo que el exceso de propiedades entregadas no se corresponde con valor alguno para el cliente. Al mismo tiempo, mientras mayor sea el exceso de propiedades entregadas, el productor incurre en gastos proporcionales a este exceso y a la masa asociada del metal por concepto de sobreconsumo de materiales, energía y otros gastos. Al mismo tiempo, mientras mayor sea la propiedad asumida por destino se tendrá una menor probabilidad de aceptación del destino asumido (h), y por tanto, mayor será el riesgo que se asume de que la hornada sea rechazada una vez laminada ($1 - h$). Se requiere, por tanto, asumir un compromiso razonable entre ambos indicadores.

VARIABLES DE DECISIÓN:

- Destino asignado a cada hornada (taller donde se ha de procesar la hornada, perfil (sección transversal) y grado de calidad que deberá ser asegurado al cliente).

DATOS DE ENTRADA:

- Toda la información referida a la composición química de las hornadas en proceso, parámetros de las ecuaciones que describen las propiedades para los talleres

de laminación de perfiles, información asociada a las normas que describen las exigencias de los indicadores de calidad, etc.

Se requiere definir un compromiso entre la minimización del exceso de todas y cada una de las r propiedades normadas entregadas, por el peso de las hornadas y el riesgo asumido (probabilidad de rechazo de la hornada una vez laminada, por el sistema de aceptación – rechazo).

$$\sum_i \sum_j \max \left\{ w \frac{[A_h(R_{ijk}) - R_{jk}^n] P_i \Theta_{ij}}{R_{jk}^n}, (1-w)(1-h) P_i \Theta_{ij} \right\}; k = 1, \dots, r \quad (1)$$

$$A_h[R_{ijk}(x)] - R_{jk}^n \geq 0; j = 1, \dots, m; k = 1, \dots, r; i = 1, \dots, n \quad (2)$$

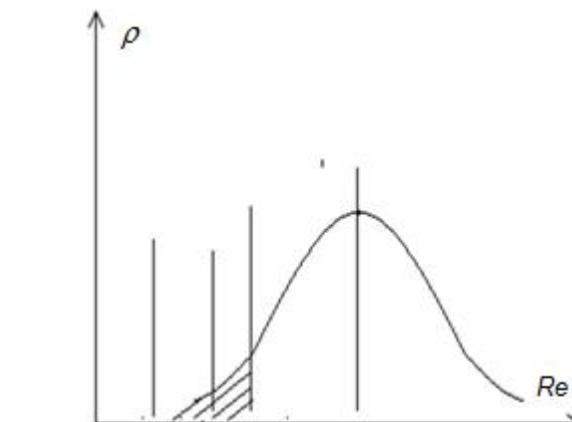
$$\sum_i \Theta_{ij} P_i \leq Q_j; j = 1, \dots, m \quad (3) \quad (2)$$

$$\sum_j \Theta_{ij} \leq 1; i = 1, \dots, n \quad (4) \quad (3)$$

R_{ijk} - Valor estimado de la propiedad k, según composición química de la hornada i, por el destino j.

$A_h(R_{ijk})$ – Valor asegurado con una probabilidad igual a h de la propiedad k, según composición química de la hornada i, por el destino j.

En la figura 4 se ilustra el valor asegurado con una probabilidad h de una propiedad R_{jk} contraposición a los valores normados 1, 2 y 3. El área a la izquierda del valor normado, debajo de la distribución de probabilidades, constituye el riesgo que se asume a que la hornada sea rechazada por el sistema de aceptación –rechazo (clasificación de hornadas) una vez laminada.



$$R^{n1} \quad R^{n2} \quad A[R^n] = R^{n3} \quad R^n$$

Figura 4. Valores calculado, asegurado y normados

R_{ij}^n - valor normado de la propiedad R, para el destino j.

$A[R]$ valor asegurado de la propiedad

$Rn1, Rn2, Rn3$ valores normados 1, 2, 3 de la propiedad R .

P_i Peso de la hornada i

θ_{ij} – Variable de decisión, la que adopta valor 1 en caso de asignarse el destino j a la hornada i y valor 0 en caso contrario.

b – probabilidad de que la hornada cumpla con las propiedades normadas una vez laminada.

Q_j – Peso total de metal a entregar por el destino j por la empresa a sus clientes en cada momento en que debe decidir destinos de hornadas, en el turno de trabajo.

Las r funciones – objetivos Z_k indican la intención de minimizar la máxima diferencia ponderada entre el exceso del valor asegurado con una probabilidad mayor o igual a b entregado de la propiedad k con respecto a sus valores normados, normalizado con respecto al valor normado, y los riesgos sumarios asumidos por hornadas, para sus destinos seleccionados, de incumplir la propiedad normada para la masa de metal producida por hornadas.

Las restricciones (2) obligan al cumplimiento del destino asignado con una probabilidad mayor o igual a b para todas las propiedades, todos los destinos, de todas las hornadas asignadas.

Las restricciones (3) obligan al cumplimiento de las entregas de los compromisos Q_j asumidos por la empresa por cada destino j .

Descomposición de la tarea conceptual en subtareas

La tarea planteada se descompone de forma natural en las siguientes subtareas:

- Generación de opciones de destino por cada hornada recién producida
- Selección de la mejor combinación de opciones de destino en cada momento que se requiera entregar determinadas cantidades de metal Q_j por los diferentes destinos.

En la generación de opciones se toma en consideración la circunstancia que al cumplirse el límite de fluencia se cumple generalmente las restantes propiedades, por lo que se puede solucionar esta tarea asegurando tan solo esta propiedad y eliminando, en caso necesario, aquellas opciones que no cumplen alguna entre las restantes propiedades (se considera tan solo, en este trabajo, el límite de rotura).

Queda planteada la tarea de la generación de opciones de destino por el siguiente modelo:

Minimizar

$$Z_k = \sum_j \max \left\{ w \frac{[A_h(R_j) - R_j^n]}{R_j^n} \Theta_j, (1-w)(1-h)\Theta_j \right\}; \quad k = 1, \dots, r \quad (5)$$

Asegurando el cumplimiento de:

$$A_h(R_j) - R_j^n \geq h\Theta_j; \quad j = 1, \dots, m; \quad (6)$$

$$\sum_j \Theta_j = 1; \quad (7)$$

Aquí Θ_j adopta valor 1 si se adopta destino j y valor 0 en caso que se adopte otro destino cualquiera.

En el modelo (5) – (7) R_j se refiere tan solo al límite de fluencia de la hornada recién producida, estimado según composición química, R_{nj} al valor normado de esta propiedad, Θ_j a la decisión de asignar o no el destino j a la hornada recién producida. El modelo anterior se soluciona de forma muy sencilla por el método de búsqueda exhaustiva, de la siguiente forma: se calcula $A_h(R_j) - R_j^n$ por los diferentes destinos, se toman en consideración tan solo aquellos destinos que tienen exceso de la propiedad para diferentes valores de h , se calcula la probabilidad de aceptación de la hornada una vez laminada y el valor de la función objetivo considerando el valor máximo entre ambos componentes de la función objetivo, se verifica el cumplimiento del valor normado del límite de rotura. En caso que no se cumpla se elimina entre las opciones, las que son ordenadas de acuerdo al valor de la función objetivo.

En la selección de opciones de destino el modelo original queda simplificado, de la forma siguiente:

Minimizar:

$$Z_k = \sum_j \max \left\{ w_1 [A_h(R_{ij}) - R_{ij}^n] (1-w_1)(1-h), P_j \Theta_{ij} \right\} \quad (8)$$

Asegurando el cumplimiento de:

$$\sum_i P_i \geq Q_j; \quad j = 1, \dots, m \quad (9)$$

$$\sum_j \Theta_{ij} \leq 1; \quad i = 1, \dots, n \quad (10)$$

Puede requerirse destinar hornadas para su venta como semiproducto, lo que se realiza por su marca de acero. En este caso, las hornadas a exportar se seleccionan entre las que no fueron destinadas a los talleres de producción de perfiles y que al mismo tiempo satisfacen los requerimientos de la marca en cuestión. En cualquier caso el personal encargado de la toma de decisiones puede seleccionar cualquiera de

las opciones generadas en correspondencia con el modelo (8) – (10), tomando en consideración factores que no aparecen en los modelos mostrados.

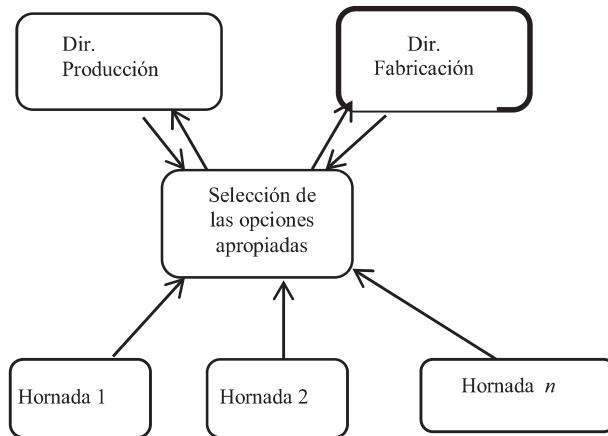


Figura 5. Esquema general de descomposición de la tarea de destino del metal

Esta relación de selección por el nivel superior de las opciones entregadas por los sistemas del nivel inferior puede ser considerada como una estructura independiente de preparación y toma de decisiones.

Los sistemas de ingeniería están destinados a la solución de tareas de preparación y toma de decisiones, relacionadas con la actividad del ingeniero en las instituciones productivas y se identifican por el carácter global de las decisiones que se requiere preparar. No existen tareas de ingeniería aisladas y, por lo tanto, las soluciones preparadas por diferentes sistemas requieren, en el caso general, ser conciliadas entre sí.

Se requiere, por tanto, definir cuáles son las tareas que han de solucionarse y cómo ellas se relacionan. En otras palabras, es preciso disponer de metodologías prácticas que permitan insertar la tarea objeto de estudio en el entorno donde ella se debe solucionar y descomponerla, en caso de necesidad, en subtareas relacionadas.

Análisis Interno

Entre las propiedades de las barras corrugadas para la construcción se priorizan por los clientes y las normas el límite de fluencia y el límite de rotura [12, 13, 14], por lo que serán las propiedades a identificar en el presente trabajo para los talleres de laminación 1 y 2.

Las propiedades mecánicas se identifican a partir del Análisis de Regresión. Para poder realizar el procesamiento estadístico planteado se utiliza el experimento pasivo a partir de la base de datos del laboratorio de ensayos mecánicos de la industria productora de Acero correspondiente a los resultados

de las hornadas producidas por los laminadores 1y 2 incluyendo todos los perfiles laminados desde el año 2001 hasta el 2014, los que incluyen las propiedades mecánicas y la composición química. La estimación se realizó con los datos de cerca de 15000 hornadas ordenadas por laminadores.

Se confeccionó en Excel dos tablas con los resultados de la composición química y las propiedades de los ensayos mecánicos para ambos laminadores para poder filtrar y ordenar cada perfil incluyendo el diámetro, la composición química, el Re y Rm . El procesamiento de los datos estadísticos se realizó con el paquete STATGRAPHICS Plus-5.1, el que facilita la manipulación de gran cantidad de datos; utilizando la opción de la regresión múltiple se evaluaron los resultados señalados anteriormente.

Identificación de los modelos para RE y RM por laminador

A partir de una base de datos de 5100 hornadas, una vez filtradas 1000 hornadas con errores significativos con respecto a un modelo de segundo orden, se elaboró modelos logarítmicos auxiliares, se obtuvo las potencias de mejor ajuste, de la utilización de las cuales se obtuvo el modelo:

$$Re = -118785,0 - 26,2179 C2 + 21,09 CMn - 1,68611Cr + 15,3657 CSi + 40,2315 Cu - 31788,1 Cu-0,29 - 0,0497626 D + 121165,0 D-0,008 - 200,196 LnSi - 31,5319 MnSi - 3,69927 Ni + 10,1395 P + 29405,6 S\lambda^{0,007}$$

Como el p-valor en la tabla ANOVA es inferior a 0.01, entonces existe una relación estadísticamente significativa entre las variables al 99% de nivel de confianza.

El estadígrafo R-cuadrado indica que el modelo ajustado explica el 83,3754% de variabilidad de Re . El estadígrafo R-cuadrado ajustado, el más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 83,3328%. El error estándar de la estimación muestra la desviación standard de los residuales es de 1,49285. Este valor puede ser utilizado para construir límites de predicción para las nuevas observaciones mediante la selección de la opción de reportes del menú de texto.

El error absoluto medio (EAM) 1,26055 es el valor medio de los residuales. El estadígrafo de prueba Durbin-Watson (DW) de residuos para determinar si existe alguna correlación significativa basada en el orden en los cuales ocurre en el fichero de datos. Como el P-valor es mayor que 0.05, no hay indicación de autocorrelación serial en los residuales en la determinación de si el modelo puede ser simplificado. Como el P-valor es menor o igual a 0.05 para todos los términos, entonces todos ellos son estadísticamente significativos al nivel de confianza del 95% o mayor.

Exceso de Re con respecto a su valor calculado, para asegurar una probabilidad del 95% ser aceptado el destino: $\Delta Re = 1,64 * 1,49 = 2.44 \text{ kgf/mm}^2$

Utilizando la misma metodología fueron halladas las expresiones para el cálculo de Rm en el taller 1, Re y Rm en el taller 2. Los resultados fueron:

Ecuación de Re en el Taller 1

$R_m = 113667,0 - 5,80743 Mn + 14,2106 P + 49,3703 Cu + 917,57 \log_{10}C - 101,916 \log_{10}Cu - 1550,13 \log_{10}D - 37807,6 C 0,011 + 78,3117 Si 0,011 - 75964,9 D 0,009 - 2,16414 C^2 + 5,45527 Cr^2 + 0,798275 C D + 16,8775 C Mn - 0,365901 Cu D$

R-squared = 88,8733 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 88,8456 percent

Standard Error of Est. = 2,6406

Mean absolute error = 2,23291

Durbin-Watson statistic = 1,92302 (P=0,0019)

Lag 1 residual autocorrelation = 0,0381812

Exceso de R_m con respecto a su valor calculado, para asegurar una probabilidad del 95% ser aceptado el destino: $\Delta R_m = 1,64 * 2,64 = 4,33 \text{ kgf/mm}^2$

Ecuaciones de regresión elaboradas y generación de opciones

Los datos calculados coinciden con errores semejantes a los errores estándar de las correspondientes ecuaciones de regresión, lo que confirma la validez de las ecuaciones obtenidas.

De esta manera se obtiene el valor de la probabilidad de aseguramiento de la propiedad normada, calculada a partir de la distribución normal estándar, con valor medio igual a 0 y 3 para R_n . La variable normalizada estándar, para cualquier propiedad en cualquier laminador se calcula por:

Ecuación obtenida

$$h = -2,55718 - 0,405186 \ln z - 0,0319447 z^2 + 3,42947 z^{0,2028}$$

El estadígrafo R-cuadrado muestra que el modelo ajustado explica el 99,9061 de la variabilidad de Prob para los datos utilizados, mientras que el error medio esperado es de tan solo 0,0037, lo que satisface totalmente las necesidades de esta estimación.

S - error estándar de la ecuación de regresión obtenida para el cálculo de R.

Se elaboró la ecuación de regresión para la estimación de la probabilidad de aseguramiento del valor de R_n a partir de los siguientes datos tabulados para las distribuciones normales estándar [12] para $0 < z \leq 3$, correspondientes a las probabilidades $0,5 < \text{Prob} \leq 0,9987$.

Durante varios años se ha procesado eficazmente, hornada por hornada, el modelo de generación de opciones integrándose al sistema general de dirección de la calidad en la Empresa objeto de estudio.

Para la introducción práctica de la selección de opciones se requiere el mejoramiento de la organización de la producción en la empresa objeto de estudio. Mientras tanto esta última tarea está siendo desarrollada algorítmicamente por los autores.

CONCLUSIONES

La generación de opciones de destino es parte componente de la tarea general de dirección de la producción y, como tal debe insertarse adecuadamente en la jerarquía de tareas de esta función.

La generación y selección de opciones de destino constituyen la tarea de selección de materiales, estudiada con éxito por reconocidos autores. La tarea de generar y seleccionar opciones se integra con la de aceptación o rechazo de hornadas constituidas. Además, la modelación matemática de las propiedades de los aceros exigió un enfoque amplio, a partir del concepto que los modelos más generales incluyen a los más particulares, así los modelos lineales son un caso particular de los no lineales. En el caso de ser adecuado un modelo lineal, éste queda como caso particular del no lineal.

El análisis externo de la tarea de toma de decisiones de destino permite elaborar el modelo matemático conceptual y su descomposición por las diferentes hornadas producidas. La tarea para cada hornada constituye una tarea de generación de opciones de destino de la hornada. Las ecuaciones de regresión obtenidas permiten hallar valores calculados y asegurados con determinada probabilidad h de los valores de Re y Rm para los talleres 1 y 2. Los valores obtenidos de los errores estándar de las ecuaciones de Re y Rm son aun altos, lo que determina altos excesos de ambas propiedades para asegurar una probabilidad del 95 % de su cumplimiento. Para asegurar inferiores excesos de propiedades se requiere, bien reducir la probabilidad de aseguramiento o bien utilizar métodos más precisos de modelación. La estimación de la probabilidad de aseguramiento de las propiedades normadas puede ser estimada con ayuda de expresiones de aproximación de esta probabilidad a partir de los datos de las distribuciones normales estándar de la bibliografía.

REFERENCIAS

- [1] Arzola, R. J. 2000. *Selección de Propuestas*. Editorial Félix Valera ISBN 978-959-07-1762-8, La Habana, Cuba.
- [2] Arzola, R. J. 1989. *Sistemas de Ingeniería*. Editorial Científico Técnica, ISBN: 959-258-079-0,), La Habana, Cuba.
- [3] Arzola, J. y Suárez L. 1993. *Reglas de Conducta en la proyección y conducción de procesos de calentamiento del acero*. Rev. Argus, Saltillo, México.
- [4] Arzola, J. *Análisis y Síntesis de Sistemas de Ingeniería*. Monografía accesible desde www.bibliomaster.com.
- [5] Ashby, F. M. 2011. *Materials Selection in Mechanical Design*. FourthEditions, Editorials ELSEVIER Ltd, Oxford, ISBN: 978-1-85617-663-7, USA.

- [6] Ashby, F. M., Shercliff, H., & Cebon, D. 2010. *Materials: Engineering, science, processing and design*. Second Editions. Butterworth-Heinemann, ISBN 978-1-85617-895-2. North American edition by Editorials ELSEVIER Ltd: ISBN 13: 978-1-85617-743-6, USA.
- [7] Bin, W. 1994. *CAD Interaction with CAPP*. Manufacturing Systems Design and Analysis. Ed. Chapman & Hall, Brunel University, Uxbridge, UK.
- [8] Guerra V. A. 1996. *Comportamiento de las propiedades de las barras en el laminador 200 de Antillana de Acero*. Tesis de Grado de la UDM, CUJAE, La Habana.
- [9] Hernández S. L. 2003. *Influencia de algunos elementos químicos minoritarios en el límite de fluencia de barras laminadas*. UDM, CUJAE, La Habana.
- [10] Martínez E. G. 2012. *Estudio diagnóstico preliminar de factores que inciden en el destino Grado 60 de los aceros al carbono laminados en la empresa siderúrgica José Martí*. Tesis en opción del título de Ingeniero Metalúrgico. Unidad Docente Metalúrgica.
- [11] Guliáev, A.P. 1983. *Metalografía*. Tomo 1 y 2 Ruso.
- [12] Montgomery, D.C. 1991. *Diseño y análisis de experimentos*. Grupo Editorial Iberoamérica, México .
- [13] Norma Cubana NC 7. 2002. *Barras de acero para refuerzo de hormigón*. Especificaciones.
- [14] Norma Cubana NC 165. 2002. *Barras de acero para refuerzo de hormigón. Ensayos de tracción y doblado*. Norma Cubana NC 644: 2008 Alambrón para trefilar — especificaciones de calidad.
- [15] Norma Cubana NC 752. 2010. *Barras de aceros soldables para refuerzo de hormigón* — especificaciones.
- [16] Pont, A y col. 1994. *Métodos estadísticos, Control y mejora de la calidad*. Ediciones UPC, Barcelona.

Correspondencia

Denis Zambrano Ortiz
deniszambrano73@hotmail.com

Uso de vehículos eléctricos y reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)

Use of electric vehicles and reduction of greenhouse gases emissions

GUILLERMO ROBLES MORALES¹ Y CLAUDIA SHEINBAUM PARDO¹

RESUMEN

Actualmente circulan alrededor de 37 millones de vehículos de motor en México, de los cuales unos 25 millones son automóviles de uso particular y unos 12 millones son camionetas y camiones de carga. Estos millones de automóviles privados dan cuenta de buena parte del consumo de combustibles y emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) del sector transporte.

En este trabajo se propone la introducción de vehículos eléctricos en sustitución de vehículos convencionales a gasolina. Los vehículos eléctricos no tienen emisiones de escape aunque sí las correspondientes a la generación de electricidad utilizada para la carga de sus baterías.

Se propone la sustitución de un millón de vehículos convencionales por eléctricos durante el periodo 2015-2030 en México. Se realiza estimaciones en cuanto al consumo de energía del auto convencional y del eléctrico con base en un rendimiento de combustible promedio para cada tipo de auto y en un kilometraje recorrido anual. Así mismo, se determina las emisiones de GEI del vehículo convencional y del eléctrico.

El consumo de energía de los vehículos convencionales durante el periodo 2015-2030 alcanzó los 318 000 TJ mientras que el de los autos eléctricos fue de 91 500 TJ, lo cual representa un ahorro de 71% en energía. Los automóviles convencionales emiten un total de 22.5 millones de toneladas de CO₂ equivalente durante este periodo mientras que los vehículos eléctricos emiten 12 millones, por lo que se evita la emisión de 10.5 millones de toneladas de CO₂ equivalente, 46% menos.

Estos resultados muestran que la introducción de vehículos eléctricos puede ser una medida efectiva para reducir las emisiones de GEI en el sector transporte mexicano.

Palabras clave: emisiones; gases de efecto invernadero; vehículo eléctrico.

ABSTRACT

Around 37 million of internal combustion engine vehicles are circulating in Mexico of which 25 million are private cars and 12 million are SUV and trucks. These millions of private cars account for a great deal of the energy consumption and greenhouse gases (GHG) emissions of the transportation sector. Introduction of electric vehicles in place of gasoline vehicles in Mexico is proposed in this work. Electric vehicles have no tailpipe emissions but they have those emitted by the power plants generating the electricity they use.

It is proposed the substitution of around one million of conventional vehicles by electric ones during the period 2015-2030 in Mexico. Estimations of energy use by the electric and gasoline vehicles are made based on an average fuel economy for every type of vehicle and an average annual mileage. Likewise emissions of greenhouse gases of both types of vehicles are estimated. Electric vehicles energy consumption was 71% less than that of the gasoline vehicles during the years 2015-2030. On the other hand, electric cars emissions were 46% less than those of the gasoline cars. The results show that the introduction of electric vehicles can be an effective means of reducing GHG emissions in the transportation sector in Mexico.

Keywords: emissions; greenhouse gases; electric vehicle.

INTRODUCCIÓN

Según el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático de las Naciones Unidas (IPCC, por sus siglas en inglés), el cambio climático global constituye una amenaza potencial para el desarrollo económico y ambiental de nuestro planeta Tierra. Por ende, el IPCC propone la necesaria y urgente estabilización de las concentraciones de GEI en la atmósfera terrestre a un nivel que impida una alteración peligrosa en el sistema climático mundial.

Vehículo eléctrico

Un vehículo eléctrico (VE) es aquél que usa uno o varios motores eléctricos para su tracción a partir de la energía eléctrica almacenada en baterías que se recargan desde la red eléctrica. En las baterías, la energía química almacenada se transforma en energía eléctrica y posteriormente, a través del motor eléctrico, se convierte en energía mecánica.

Para recargar sus baterías, el vehículo eléctrico necesita conectarse a una toma de corriente eléctrica, ya sea de baja intensidad de corriente (recarga lenta) o de alta intensidad (recarga rápida). Entre sus principales características, el VE destaca por su nula contaminación durante su operación, ya que en su circulación no produce emisiones contaminantes. Son más eficientes energéticamente que sus pares convencionales. También cabe mencionar su inexistente contaminación acústica, salvo el inevitable ruido causado por su propia rodadura, así como menores costos de operación y mantenimiento. Su principal desventaja radica en su alto costo de adquisición.

Los vehículos eléctricos son más eficientes energéticamente que los convencionales propulsados por motores de combustión interna. Cuando se analizan los rendimientos “desde el tanque a la rueda” (Tank to Wheel), el rendimiento del VE (desde las baterías a las ruedas) es notablemente superior al convencional (desde el depósito de combustible a las ruedas). En general, el rendimiento de los VE es del

orden del 83% mientras que en los motores de combustión interna modernos de la mejor tecnología disponible, su eficiencia se sitúa alrededor del 33%.

Sin embargo, para realizar una justa comparación de ambas tecnologías, es necesario observar el proceso en su conjunto, “desde el pozo a la rueda” (Well to Wheel) para obtener datos más realistas sobre la eficiencia energética de los dos tipos de vehículos. Así, según la fuente de energía y la tecnología utilizada para la generación de electricidad (centrales térmicas, nucleares, ciclo combinado, plantas de energías renovables...) la eficiencia energética y el balance de emisiones, son variables.

Considerando el análisis desde el pozo a la rueda y para el caso de un sistema de generación y distribución eléctrica típica, la eficiencia del vehículo eléctrico frente a un vehículo de combustión interna de la mejor tecnología disponible es del orden de 8 puntos superior, con una mejora en su eficiencia energética de alrededor de un 30%. A estos números llegamos si se considera un rendimiento de generación eléctrica del 50%, del 92% de eficiencia en la transmisión y la distribución de electricidad y de un 92% en la recarga de la batería, que dan lugar a un 42,2% de rendimiento desde el “pozo al tanque”, frente a un 84% del vehículo convencional, correspondientes a la refinación y transporte de la gasolina, lo que da como resultado un balance “pozo a la rueda” del 35% de eficiencia para el vehículo eléctrico frente a un 27% del vehículo a gasolina de nueva tecnología.

Los vehículos eléctricos no emiten ningún tipo de gases contaminantes durante su funcionamiento. Y no sólo en lo que a GEI se refiere, sino también de otros gases y partículas contaminantes nocivas para el ser humano y para el medio ambiente, incluyendo CO, NO_x, HC, PM10, etc. Sin embargo, haciendo un análisis desde el “pozo a la rueda”, el impacto medioambiental vendrá determinado por la fuente primaria de energía utilizada para generar la electricidad que mueve a los vehículos eléctricos. Así, si tomamos en cuenta las emisiones de GEI que se dan para producir un kWh de electricidad y transportarla y distribuirla hasta el punto de consumo, podemos decir que un VE puede ahorrar durante su vida útil entre 10 y 30 toneladas de CO₂ respecto a un vehículo convencional. La diferencia entre ambas cifras viene determinada por las distintas alternativas tecnológicas utilizadas para la generación de la electricidad.

El costo de adquisición de un VE es superior al de un vehículo equivalente convencional. La batería es el sistema que provoca gran parte del encarecimiento del VE respecto al convencional, pudiendo suponer hasta el 60% del precio del vehículo. Sin embargo la arquitectura técnica del VE, con un 90% menos de componentes que un vehículo de combustión interna, permite que los costos de operación y mantenimiento sean muy inferiores a los de un vehículo convencional. También debemos tomar en cuenta las diferencias de costo entre la electricidad y la gasolina. El costo del kWh es varias veces inferior al costo del litro de gasolina. Igualmente deben considerarse los incentivos fiscales que los gobiernos ofrecen actualmente para la adquisición de un vehículo eléctrico. Todo lo anterior permite que se equilibren los costos entre los dos tipos de vehículos.

En este trabajo se propone la sustitución de vehículos convencionales a gasolina por vehículos eléctricos de alta tecnología. Se estiman el consumo energético y las emisiones de GEI de cada tipo de vehículo para el periodo 2015-2030 y se evalúa el impacto que esta medida tiene en las emisiones del sector transporte. Los gases de efecto invernadero considerados son el dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O).

MATERIALES Y MÉTODOS

El impacto medioambiental de la introducción de vehículos eléctricos que sustituyen a vehículos convencionales que usan gasolina se evalúa comparando el consumo de combustible y las emisiones de GEI correspondientes de cada tipo de vehículo.

Consumo de energía

El consumo de energía se estima utilizando el rendimiento vehicular de cada tipo de vehículo, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$E = N * KM * PC / EF \quad (1)$$

Donde,

E: consumo de energía (TJ)

N: número de vehículos

KM: kilometraje recorrido anual, km

EF: rendimiento de combustible, km/lt

PC: poder calorífico del combustible, TJ/litro

El rendimiento de combustible usado para el auto convencional fue de 13.6 km/litro para el año 2015, el cual es típico para un auto compacto en México. Se supuso un incremento en este rendimiento del 1% anual, por lo que alcanzó un valor de 15.6 km/litro en 2030.

Para el auto eléctrico se consideró un rendimiento de combustible equivalente de 50.6 km/litro [1] que se consideró constante a lo largo del periodo considerado.

El kilometraje recorrido anual para ambos tipos de vehículos se supuso de 16,529 kilómetros, que también se consideró constante durante el periodo de estudio.

El poder calorífico de la gasolina usado en las estimaciones es de 32.64 TJ/litro y se tomó del Balance Nacional de Energía de México de 2013 [2], el cual permanece constante durante los años de estudio.

De la misma manera, se estimó el consumo de electricidad por parte del vehículo eléctrico considerando un rendimiento eléctrico de 17.4 kWh/100 km [1] de acuerdo con:

$$E = N * KM * RE \quad (2)$$

Donde,

E: consumo de energía (kWh)

N: número de vehículos

KM: kilometraje recorrido anual, km

RE: rendimiento del vehículo eléctrico (kWh/100 km)

Este consumo de electricidad se transforma a TJ usando el factor de conversión correspondiente.

Emisiones de GEI

La metodología que se utiliza en la estimación de las emisiones de gases de efecto invernadero para el vehículo convencional es la que se describe en las *Directrices del IPCC de 2006* [3].

Para el caso del vehículo convencional, las emisiones de CO₂ se estimaron usando el método sectorial de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$EM\ CO_2 = E * FE * FO \quad (3)$$

Donde:

EM CO₂: emisiones de CO₂, Mg

E: consumo de energía, TJ

FE: factor de emisión de la gasolina, Mg/TJ

FO: factor de oxidación del combustible

Por otro lado, las emisiones de CH₄ y N₂O se estiman utilizando:

$$EM = E * FE \quad (4)$$

Donde:

EM: emisiones de CH₄ o N₂O, Mg

E: consumo de energía, TJ

FE: factor de emisión de gasolina, Mg/TJ

Los factores de emisión y oxidación para la gasolina empleados en la estimación de las emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O son los publicados por el IPCC en sus *Directrices* y se muestran en la tabla 1 [3]. Estos valores permanecen constantes a lo largo del periodo 2015-2030.

Tabla 1. Factores de emisión de gasolina

	kg/TJ
CO ₂	69300
CH ₄	3.8
N ₂ O	5.7

Uso de vehículos eléctricos

El factor de oxidación empleado es igual a la unidad

Para el caso del vehículo eléctrico, sus emisiones se estiman a partir de un factor de emisión eléctrico (FEe) que se determina dividiendo las emisiones totales de GEI emitidas debidas a la producción de electricidad entre la electricidad neta entregada a la red y se expresa en kg (GEI)/ kWh o en unidades equivalentes. Este factor de emisión eléctrico se muestra en la tabla 2 y corresponde a una estimación propia del año 2013 de acuerdo a la mezcla de combustibles empleados para la generación de electricidad de ese año en México [4]. Para estimar las emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O se utiliza la siguiente expresión:

$$EM = E * FEE \quad (5)$$

Donde:

EM: emisiones de CO₂, CH₄ o N₂O, Mg

E: consumo de energía, TJ

FE: factor de emisión eléctrico Mg/TJ

Tabla 2. Factores de emisión de electricidad

	Mg/TJ
CO ₂	131.850
CH ₄	0.0077
N ₂ O	0.0007

Igualmente, estos valores se consideran constantes durante el periodo de estudio.

RESULTADOS

Se supone la introducción de un millón de vehículos eléctricos que sustituyen a los convencionales, empezando con 65,000 en el año 2015 hasta alcanzar el millón en 2030, aumentando linealmente durante el periodo.

Consumo de energía del vehículo convencional (VC)

Utilizando la ecuación 1, se puede estimar el consumo de energía del vehículo convencional haciendo uso de los valores para el número de vehículos sustituidos, el kilometraje recorrido anual y el poder calorífico de la gasolina que se han mencionado anteriormente. Esto se hace para cada año desde 2015 hasta 2030. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Consumo de energía de los vehículos convencionales, 2015-2030

AÑO	TJ	TJ (acumulado)
2015	2,579	2,579
2017	7,584	15,269
2019	12,390	37,670
2021	17,005	69,396
2023	21,432	110,070
2025	25,679	159,326
2027	29,750	216,812
2029	33,650	282,183
2030	35,538	317,721

Como puede observarse en la tabla 3, el consumo de energía de los vehículos convencionales aumenta de 2,579 TJ a 35,538 TJ de 2015 a 2030. La tabla 3 también muestra el consumo de energía acumulado durante el periodo, el cual alcanza un valor de 317,721 TJ.

Consumo de energía del vehículo convencional (VC)

Con ayuda de la ecuación 2, se estima el consumo de energía correspondiente al vehículo eléctrico empleando el número de vehículos sustituidos, el kilometraje recorrido anual y el rendimiento eléctrico propuestos. Lo anterior se realiza para cada año del periodo de estudio. La tabla 4 muestra los resultados encontrados.

Tabla 4. Consumo de energía de los vehículos eléctricos, 2015-2030

AÑO	TJ	TJ (acumulado)
2015	673	673
2017	2,019	4,038
2019	3,365	10,096
2021	4,712	18,846
2023	6,058	30,288
2025	7,404	44,423
2027	8,750	61,250
2029	10,096	80,769
2030	10,769	91,538

Uso de vehículos eléctricos

Para el caso de los vehículos eléctricos, su consumo energético crece de 673 TJ en 2015 a 10,769 TJ en 2030. Por otro lado, el consumo de energía acumulado llega a 91, 538 TJ en el año 2030.

Comparando los resultados obtenidos de las tablas 3 y 4 para cada tipo de vehículo, se desprende que el vehículo eléctrico consume alrededor del 30% de la energía consumida por su contraparte convencional, lo que significa un ahorro energético del 70%. Igualmente, el consumo acumulado de energía del vehículo eléctrico representa un 28% del acumulado por el convencional, significando un ahorro del 72%.

Emisiones de GEI del vehículo convencional (VC)

Las emisiones de GEI correspondientes a CO₂, CH₄ y N₂O para el vehículo convencional se determinan haciendo uso de las ecuaciones 3 y 4, utilizando los consumos de energía de la tabla 3 y los factores de emisión de la tabla 1. Para poder comparar las emisiones de CO₂ con las de CH₄ y N₂O se hace uso del potencial de calentamiento global (PCG) que es una medida relativa de cuánto calor puede ser atrapado por un determinado gas de efecto invernadero en comparación con un gas de referencia, que es el dióxido de carbono (PCG= 1). El PCG del metano es 25 y el del óxido nitroso es 298 [5]. Las emisiones de CH₄ y N₂O obtenidas con la ecuación 4 se multiplican por sus respectivos PCG para obtener sus emisiones en lo que se conoce como CO₂ equivalente (CO₂ eq.) Los resultados en Mg de CO₂ eq se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. Emisiones de GEI de los vehículos convencionales, 2015-2030

AÑO	CO ₂ (Mg)	CH ₄ (CO ₂ eq, Mg)	N ₂ O (CO ₂ eq, Mg)	Total (CO ₂ eq, Mg)
2015	178,702	245	4,380	183,327
2017	525,543	720	12,881	539,145
2019	858,646	1,177	21,046	880,869
2021	1,178,418	1,615	28,884	1,208,917
2023	1,485,255	2,036	36,405	1,523,696
2025	1,779,543	2,439	43,618	1,825,601
2027	2,061,657	2,826	50,533	2,115,016
2029	2,331,963	3,197	57,158	2,392,318
2030	2,462,799	3,376	60,365	2,526,540

La tabla 5 muestra las emisiones de CO₂, CH₄, N₂O y totales de los vehículos convencionales. Estas emisiones están compuestas esencialmente por CO₂ que representa el 97.4% del total mientras que el N₂O aporta el 2.5% y el CH₄ contribuye

con un 0.1%. Estas emisiones crecen de 183,327 Mg de CO₂ eq a 2,526,540 Mg de CO₂ eq durante el periodo de estudio.

Emisiones de GEI del vehículo eléctrico (VE)

Usando la ecuación 5 junto con los consumos de energía de la tabla 4 y los factores de emisión eléctricos de la tabla 2, podemos estimar las emisiones de GEI correspondientes a los vehículos eléctricos. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 6. A las emisiones de CH₄ y N₂O obtenidas con la ecuación 5 ya se les aplicaron sus respectivos PCG por lo que dichas emisiones están dadas en Mg de CO₂ eq.

Tabla 6. Emisiones de GEI de los vehículos eléctricos, 2015-2030

AÑO	CO2 (Mg)	CH4 (CO2 eq, Mg)	N2O (CO2 eq, Mg)	CO2 eq (Mg)
2015	88,745	130	140	89,015
2017	266,235	389	421	267,045
2019	443,726	648	702	445,076
2021	621,216	907	983	623,106
2023	798,706	1,166	1,264	801,136
2025	976,196	1,425	1,544	979,166
2027	1,153,687	1,684	1,825	1,157,196
2029	1,331,177	1,944	2,106	1,335,227
2030	1,419,922	2,073	2,246	1,424,242

Igual que en el caso anterior, en la tabla 6 se muestran las emisiones de CO₂, CH₄, N₂O y totales de los vehículos eléctricos. Estas emisiones están formadas casi exclusivamente por CO₂, el cual constituye el 99.7% del total mientras que el N₂O y el CH₄ contribuyen con el restante 0.3%. Dichas emisiones aumentan de 89,015 Mg de CO₂ eq a 1,424,242 Mg de CO₂ eq durante el periodo 2015-2030.

Comparando las emisiones de CO₂ de las tablas 5 y 6 se puede apreciar que las emisiones correspondientes a los vehículos eléctricos representan de un 50% a un 58% de las de los vehículos convencionales durante el periodo de estudio, lo cual representa de 42% a 50% menos emisiones. Con respecto a CH₄, las emisiones de los vehículos eléctricos representan de 53% a 61% de las de los convencionales y las de N₂O de los eléctricos significan sólo un 3-4% de las de los convencionales. Lo anterior nos da una idea clara de las emisiones de GEI que se puede evitar usando vehículos eléctricos en lugar de convencionales.

Uso de vehículos eléctricos

Emisiones de GEI evitadas

Usando las tablas 5 y 6 se puede deducir las emisiones evitadas por el uso de vehículos eléctricos en lugar de convencionales, las cuales se muestran en la tabla 7.

Tabla 7. Emisiones evitadas por el uso de vehículos eléctricos

AÑO	CO2 (Mg)	CH4 (CO2 eq, Mg)	N2O (CO2 eq, Mg)	Total (CO2 eq, Mg)
2015	89,957	115	4,240	94,312
2017	259,307	332	12,460	272,099
2019	414,920	529	20,344	435,794
2021	557,202	708	27,901	585,812
2023	686,549	870	35,141	722,560
2025	803,347	1,014	42,074	846,435
2027	907,970	1,142	48,708	957,820
2029	1,000,786	1,253	55,052	1,057,091
2030	1,042,877	1,303	58,119	1,102,299

Como puede apreciarse en la tabla 7, las emisiones evitadas que se logran con el uso de los VE van de 94 312 Mg de CO₂ eq en el año 2015 a 1,102,299 Mg de CO₂ en el año 2030.

Tabla 8. Emisiones evitadas acumuladas por el uso de vehículos eléctricos

AÑO	Total (CO2 eq, Mg) (acumuladas)
2015	94,312
2017	551,405
2019	1,342,881
2021	2,441,179
2023	3,819,559
2025	5,452,075
2027	7,313,560
2029	9,379,598
2030	10,481,896

Finalmente, la tabla 8 muestra las emisiones acumuladas que se logra evitar por la sustitución de vehículos convencionales por eléctricos.

Esta tabla muestra las emisiones que se acumulan año con año con el uso de vehículos eléctricos en sustitución de los convencionales. Como se puede apreciar, las emisiones totales evitadas alcanzan un valor de 10, 481,896 Mg CO₂ eq en el año 2030.

CONCLUSIONES

Este trabajo mostró que las emisiones de GEI asociadas a los vehículos eléctricos son considerablemente inferiores que las de los convencionales, emitiendo aproximadamente la mitad de las emisiones de CO₂ y CH₄ que emiten los convencionales y sólo un 3% de las emisiones de N₂O de sus pares convencionales.

Lo anterior muestra que la sustitución de vehículos convencionales a gasolina por eléctricos representa una medida viable en la mitigación de GEI en el sector transporte mexicano.

REFERENCIAS

- [1] U.S. Department of Energy. 2014. Fuel Economy Guide, Model Year.
- [2] Secretaría de Energía. 2013. (México), Balance Nacional de Energía.
- [3] IPCC. 2006. Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Vol. 2, Capítulo 3: Combustión móvil.
- [4] Secretaría de Energía. 2014. (México), Prospectiva del Sector eléctrico, 2014-2028.
- [5] IPCC. 2007. Fourth Assessment Report: Climate Change.

Correspondencia

Guillermo Robles Morales
grom@pumas.iingen.unam.mx

Distance protection in parallel half wavelength transmission lines

MARCOS ROBERTO DE ARAÚJO¹

ABSTRACT

In scenarios of power generation bases far from load centers, the construction of extra long transmission lines is necessary to meet the growing demand for electricity. In the last decade, the use of the alternating current transmission line little longer than half wavelength has been widely discussed by researchers, however, there are still technical issues to be solved. Preliminary studies have confirmed the ineffectiveness of the conventional distance protection when applied to those lines. So, it has been proposed the use of the unconventional distance protection increased by a correction approach, that has proved satisfactory. This work presents an evaluation of the influence of the mutual coupling between parallel transmission lines little longer than half wavelength on the performance of the unconventional distance protection. All analyses were performed under steady state conditions. The system was modelled and solved using the graph theory. In the cases of phase to ground faults, it was found that the resistance deviation resulting of the influence of the mutual coupling undermine the effectiveness of the suggested correction approach. It was also found that the relay of the healthy line would trip simultaneously for faults along a great part of the faulty line extension. Assuming that the apparent impedances discontinuity in a quarter wavelength is due to the range adopted in various softwares for the argument of a complex number, the use of the unconventional distance protection proved to be feasible, however, by varying the fault resistance, it was noted an underreach of the phase loops for phase to phase faults applied nearby the sending end of the faulty line.

Keywords: parallel transmission lines; little longer than half wavelength; unconventional distance protection; mutual coupling; graphs.

INTRODUCTION

In Brazil, there is a growing demand for electricity, mainly concentrated in the Southeast region, as well as an immense hydroelectric potential still little explored, concentrated in the North region – specifically in the Amazon Basin in rivers like the Madeira, the Xingu, the Teles Pires and the Tapajós [1]. In view of such a scenario, for the use of the hydroelectric potential of northern Brazil, it is necessary the construction of extra long transmission lines (TLs), of the order of 2500 km.

The alternating current transmission line little longer than half wavelength ($\lambda/2^+$) appears as a natural solution. In the studies about the power transmission in half wavelength, which began in 1940 in the former Soviet Union, favorable effects have been verified for such configuration – there is no Ferranti effect and the stability is comparable to that of short lines [2]. Thus, it is not required neither shunt nor series compensation, which reduces the cost per unit length.

Distance protection in parallel half

However, referred as the most economically advantageous, high-voltage direct current (HVDC) lines has historically been the solution used for the power transmission over long distances, of more than about 700 km, as in Itaipu and in Madeira systems.

Mastering the technology of the TLs $\lambda/2^+$ is of capital importance to make its implementation economically viable, so as to become a competitive option in an eventual expansion of the Amazon transmission system, or in countries like China and Russia [3].

In view of the high power carrying capacity of such lines and peculiarities like very severe overvoltages during the occurrence of three-phase faults, it is essential that an effective and efficient protection scheme be used, preventing massive blackouts and the impairment of the equipments integrity [4].

In the formulation of the conventional distance protection, it is considered the series impedance model of the TL, in which the transverse admittance and the propagation effects are neglected. In view of the errors due to such simplification for long lines, Chinese researchers have proposed an alternative formulation based on the π equivalent model for the distance protection, that have performed satisfactorily in a compensated TL of 645 km [5].

When applying the unconventional distance protection to a transmission line $\lambda/2^+$, it was observed a displacement in the R-X diagram for apparent impedances seen for faults at points subsequent to a quarter wavelength. So, it has been proposed a correction method that has proved satisfactory under specific conditions [6] [7].

The objective of this work is to evaluate the influence of the zero sequence mutual coupling between parallel transmission lines little longer than half wavelength on the performance of the unconventional distance protection.

SYSTEM MODELING

The wavelength (λ) is defined as the distance between two points of the sine wave, towards its spread, lagging in phase by 2π radians:

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{v}{f} \quad (1)$$

where β is the imaginary part of the propagation constant γ ; v is the velocity of propagation; and f is the frequency [8].

The electrical length (θ) is the relationship between the line length in radians and the wavelength:

$$\theta = \frac{2\pi\ell}{\lambda} = \beta\ell \quad (2)$$

where ℓ is the total length of the TL.

In exactly half wavelength there is a singularity point. Since the wavelength increases as the frequency decreases, small increments of load could cause the system to operate in the 2nd quadrant, naturally unstable. It is therefore recommended that the TL have an electrical length of approximately 190° , which ensures a sufficient margin of safety [9].

In an ideal TL, the losses in the conductor and in the ground are ignored. Thus:

$$v = \lambda f = \frac{\omega}{\beta} = \frac{\omega}{\omega \sqrt{L_{ext} C}} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \approx c \quad (3)$$

where ω is the angular frequency; L_{ext} is the external inductance; C is the capacitance; μ_0 is the vacuum permeability; ϵ_0 is the vacuum permittivity; and c is the speed of light in vacuum. Therefore, at the industrial frequency of 60 Hz, the wavelength is of the order of 5000 km.

In this work, it is considered parallel TLs with identical parameters, three-phase alternating current, with a length little longer than half wave (2571 km), perfectly transposed and in sinusoidal steady state of 60 Hz. Furthermore, it is assumed that the entire system is balanced, having only positive sequence currents and voltages. Figure 1 shows the single-line diagram of the modeled system.

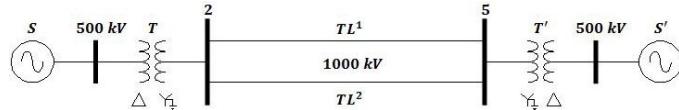


Figure 1. single-line diagram of the modeled system

Since there are no TLs $\lambda/2^+$ in operation worldwide, the conductor arrangement proposed by [10] was adopted, which is represented in figure 2. The relative position of each conductor in each bundle type is specified in Table 1, taking as a reference the center of each bundle. Each phase has 12 conductors ACSR Bluejay 1113 MCM (outside diameter of 3.1953 cm and DC resistance of 0.0606914 Ω/km) and each tower has two ground wires EHS 3/8" (outside diameter of 0.9144 cm and DC resistance of 4.41402 Ω/km), assuming temperatures equal to 65 and 40°C, respectively [11]. It was defined a separation distance of 120 m between the center of each tower. The soil was assumed to be homogeneous with resistivity equal to 1000 Ωm .

The transposition scheme of each circuit is presented in figure 3.

The TLs parameters – detailed in table 2 – were calculated using the Powergui Compute RLC Line Parameters Tool of the software MATLAB/Simulink. As is well known, even with perfect transposition, it is not possible to eliminate the zero sequence mutual coupling between parallel lines.

Distance protection in parallel half

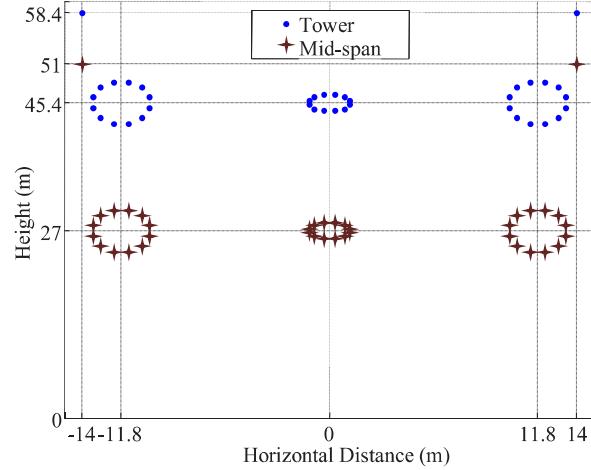


Figure 2. Conductor arrangement at a tower [10]

Table 1. Relative position of the conductors in each bundle type [10]

Conductor	Coordinates (m)	
	Circular Bundle	Elliptical Bundle
1	(0.31 , -1.15)	(0.43 , -3.00)
2	(0.84 , -0.84)	(1.17 , -2.20)
3	(1.15 , -0.31)	(1.60 , -0.80)
4	(1.15 , 0.31)	(1.60 , 0.80)
5	(0.84 , 0.84)	(1.17 , 2.20)
6	(0.31 , 1.15)	(0.43 , 3.00)
7	(-0.31 , 1.15)	(-0.43 , 3.00)
8	(-0.84 , 0.84)	(-1.17 , 2.20)
9	(-1.15 , 0.31)	(-1.60 , 0.80)
10	(-1.15 , -0.31)	(-1.60 , -0.80)
11	(-0.84 , -0.84)	(-1.17 , -2.20)
12	(-0.31 , -1.15)	(-0.43 , -3.00)

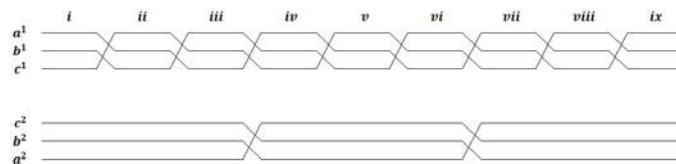


Figure 3. Transposition scheme of each circuit

Table 2. Transmission lines parameters

Transmission Lines			
	Positive Sequence	Zero Sequence	Mutual Zero Sequence
R (Ω/km)	0.005470	0.344293	0.320361
L (H/km)	0.000453	0.003175	0.001491
C ($\mu\text{F}/\text{km}$)	0.025822	0.009658	-0.000323
X (Ω/km)	0.170853	1.197041	0.562171
B ($\mu\text{S}/\text{km}$)	9.734853	3.641131	-0.121749

For the sources S and S', Thevenin equivalent parameters in Porto Velho and in Araraquara 2 busses were used (connection points of the Madeira River Transmission Line, which links the Madeira Complex to the Southeast Region of Brazil), respectively, obtained from case Aspen converted from the base case ONS BR1406A.ANA [12].

Power transformers parameters were based on [10].

The sources and the transformers parameters are detailed in table 3.

Table 3. Sources and transformers parameters

Sources		
	Positive Sequence	Zero Sequence
$Z_{ThS} (\Omega)$	$0.6500 + j42.4250$	$0.9250 + j13.5500$
$Z_{ThS'} (\Omega)$	$0.7250 + j12.9250$	$3.7750 + j28.4750$
Transformers		
	$X_T (\%)$	Voltage (kV)
T	13.4	500/1000
T'	13.4	500/1000
		Total Power (MVA)
		10 x 2000
		10 x 2000

The faults were simulated using the CCCS program (Clever Pereira ©), which performs short circuit calculation in electrical networks using the graph theory [13]. Each line was modeled as a cascade of π equivalent circuits. The positive and negative sequence parameters were calculated according to:

$$Z_\pi = B = Z_C \sinh(\gamma\ell) = Z_n \frac{\sinh(\gamma\ell)}{\gamma\ell} \quad (4)$$

$$\frac{Y_\pi}{2} = \frac{A-1}{B} = Y_C \tanh\left(\frac{\gamma\ell}{2}\right) = \frac{Y_n}{2} \frac{\tanh\left(\frac{\gamma\ell}{2}\right)}{\frac{\gamma\ell}{2}} \quad (5)$$

where Z_C is the characteristic impedance; Z_n is the TL nominal impedance; Y_C is the characteristic admittance; and Y_n is the TL nominal admittance.

For the zero sequence, it is necessary a specific approach, given the mutual impedance and admittance.

In [14], it has been proposed a formulation of the equivalent π circuit for the zero sequence networks of parallel lines with identical parameters and transposed within each single circuit. The equivalent parameters are obtained from the equations:

$$Z_{\pi 0} = \frac{1}{2} [Z_{Cm2} \sinh(\gamma_{m2}\ell) + Z_{Cm1} \sinh(\gamma_{m1}\ell)] \quad (6)$$

$$Z_{\pi 0m} = \frac{1}{2} [Z_{Cm2} \sinh(\gamma_{m2}\ell) - Z_{Cm1} \sinh(\gamma_{m1}\ell)] \quad (7)$$

$$Y_{\pi 0} = \frac{2 \tanh\left(\frac{\gamma_{m2}\ell}{2}\right)}{Z_{Cm2}} \quad (8)$$

$$Y_{\pi 0m} = \frac{\tanh\left(\frac{\gamma_{m1}\ell}{2}\right)}{Z_{Cm1}} - \frac{\tanh\left(\frac{\gamma_{m2}\ell}{2}\right)}{Z_{Cm2}} \quad (9)$$

where

$$\gamma_{m1} = \sqrt{(Z_0 - Z_{0m})(Y_0 + 2Y_{0m})} \quad (10)$$

$$\gamma_{m2} = \sqrt{(Z_0 + Z_{0m})Y_0} \quad (11)$$

$$Z_{Cm1} = \sqrt{\frac{Z_0 - Z_{0m}}{Y_0 + 2Y_{0m}}} \quad (12)$$

$$Z_{Cm2} = \sqrt{\frac{Z_0 + Z_{0m}}{Y_0}} \quad (13)$$

Positive, negative and zero sequence impedance diagrams are shown in figure 4. Figure 5 depicts the associated oriented graph. Due to the delta connection of the transformers and the requirement of a single graph for the positive, negative and

zero sequence, infinite impedance elements were inserted in the diagrams in order to satisfy such a condition.

ANALYSIS AND RESULTS

The faults (AG, BC, BCG and ABC) were simulated along the entire length of the TL 2-3-5, which is referred as the faulty line (superscript F), with small steps (1% of half wavelength), being applied at the Bus 3. The relays were installed on the Bus 2. The TL 2-4-5 is referred to in the course of the analysis as the healthy line (superscript H).

Voltage sources were set so that in all cases the pre-fault voltage at the sending end was equal to 1 p.u. 0° , and each line carried its surge impedance loading (SIL = 7548.4 MVA).

All analyses were performed under steady state conditions, so the errors related to phasor estimation were not considered.

It was evaluated the performance of the conventional distance protection for parallel lines and of the unconventional distance protection, including the correction method proposed in [6] [7].

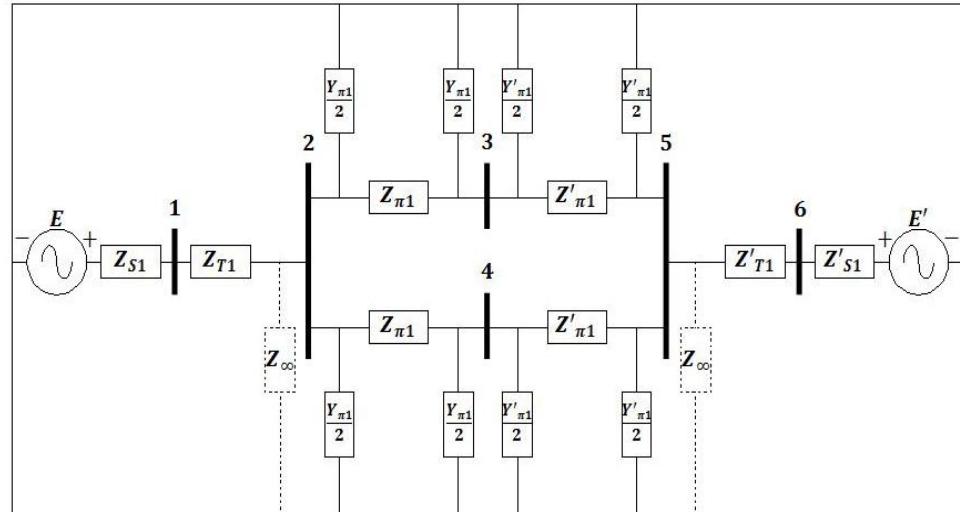
Table 4 shows the input signals for each measuring unit of the conventional distance relay for parallel TLs, where x is the distance between the relay and the fault point [15].

The zero sequence compensation factors k and k_m are given by:

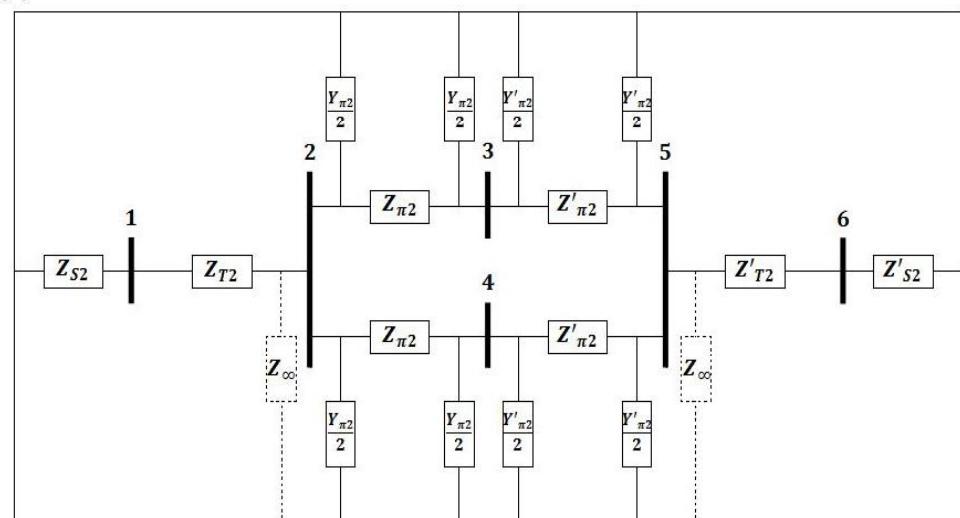
$$k = \frac{Z_0 - Z_1}{Z_1} \quad (14)$$

$$k_m = \frac{Z_{0m}}{Z_1^F} \quad (15)$$

Distance protection in parallel half



(+)



(-)

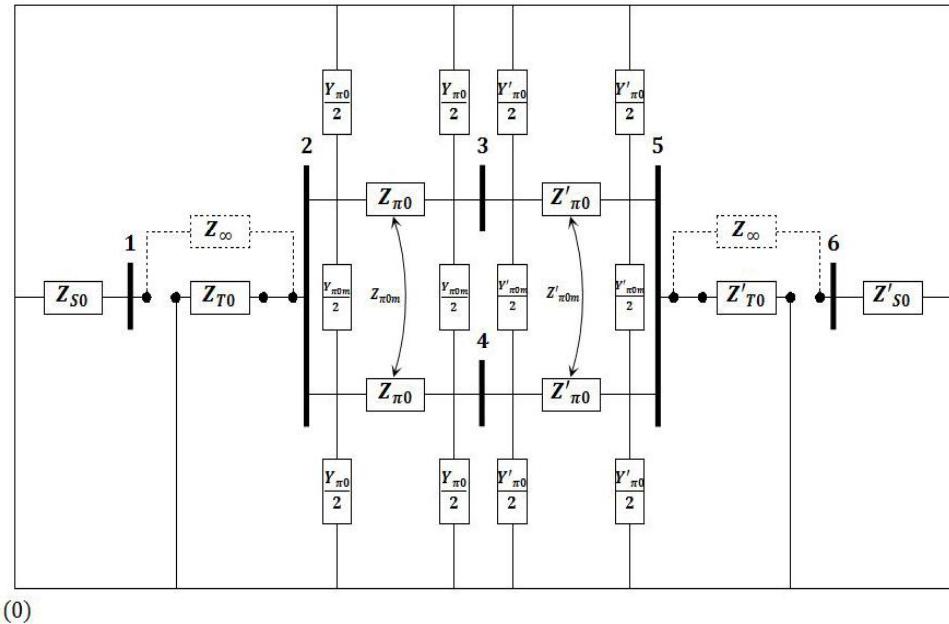


Figure 4. Positive, negative and zero sequence impedance diagrams

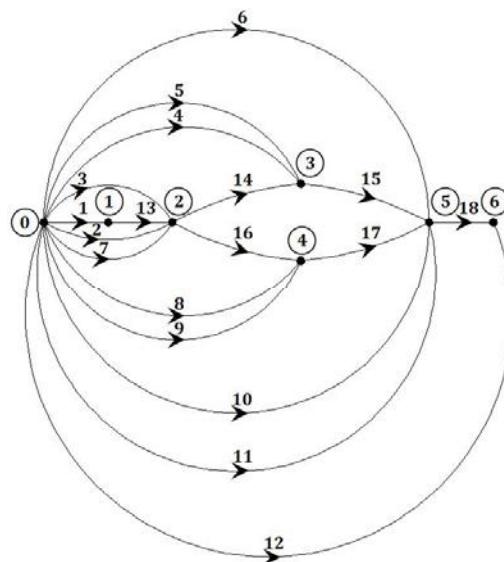


Figure 5. Oriented graph

Table 4. Input signals for each measuring unit of the conventional distance relay for parallel lines

Unit	V_R	I_R	Z_R
AG	V_a	$I_a + kI_0 + k_m I_0^H$	xZ_1
BG	V_b	$I_b + kI_0 + k_m I_0^H$	xZ_1
CG	V_c	$I_c + kI_0 + k_m I_0^H$	xZ_1
AB	$V_a - V_b$	$I_a - I_b$	xZ_1
BC	$V_b - V_c$	$I_b - I_c$	xZ_1
CA	$V_c - V_a$	$I_c - I_a$	xZ_1

A polygonal tripping characteristic was set, based on a commercial relay [16]. Figure 6 shows its first zone in the R-X diagram. Static analysis were made, ahead of the relay, considering primary ohms. An impedance reach (Z_N) of 85% of the positive sequence impedance of the line (Z_L) was defined. The resistance reach was based on the experience of energy companies [17]. The straight line defined by the load encroachment resistance (R_{LE}) aims to prevent unwanted fault detection by the relay during heavy load flow [16].

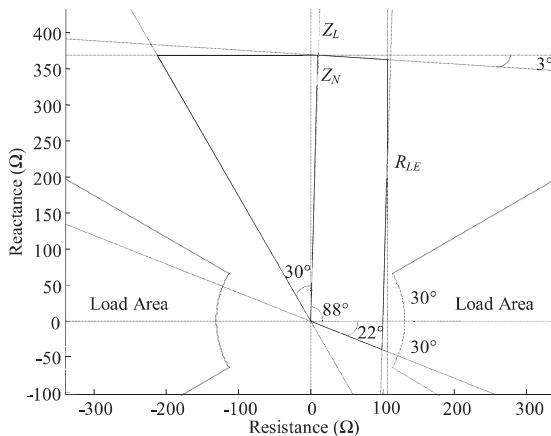


Figure 6. Impedance plane with the operation characteristic set

The apparent impedances calculated by the AG and BC measuring units of the conventional distance relays of the faulty and healthy lines for AG and BC solid faults, respectively, are displayed in figures 7 and 8. The apparent impedances are represented by the points. The triangle indicates that the fault was applied at the sending end of the TL, while the square, at the receiving end.

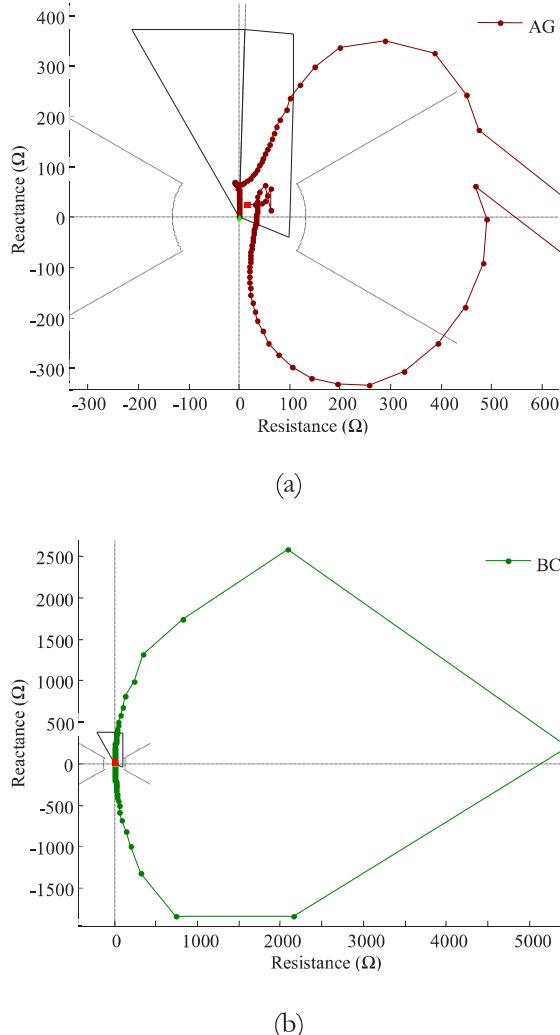


Figure 7. Apparent impedances calculated by the measuring units of the conventional distance relay of the faulty line: (a) AG for AG faults and (b) BC for BC faults

The apparent impedances calculated by the AG unit of the faulty line relay are equal to the real positive sequence impedance (xZ_1) for AG faults applied at short and medium distances (up to 240 km from the sending end), due to the correction of the zero sequence mutual impedance effect. For faults applied at greater distances, the deviations of the apparent impedances become gradually and significantly accentuated, because of the neglect of the capacitive effect, which causes the relay to underreach and to overreach. Similarly, for BC faults, BC unit of the faulty line relay underreaches significant parts of the TL, in addition to overreach points subsequent

Distance protection in parallel half

to the operation characteristic limit. Such behavior clearly makes unfeasible the application of the conventional distance protection to parallel TLs $\lambda/2^+$.

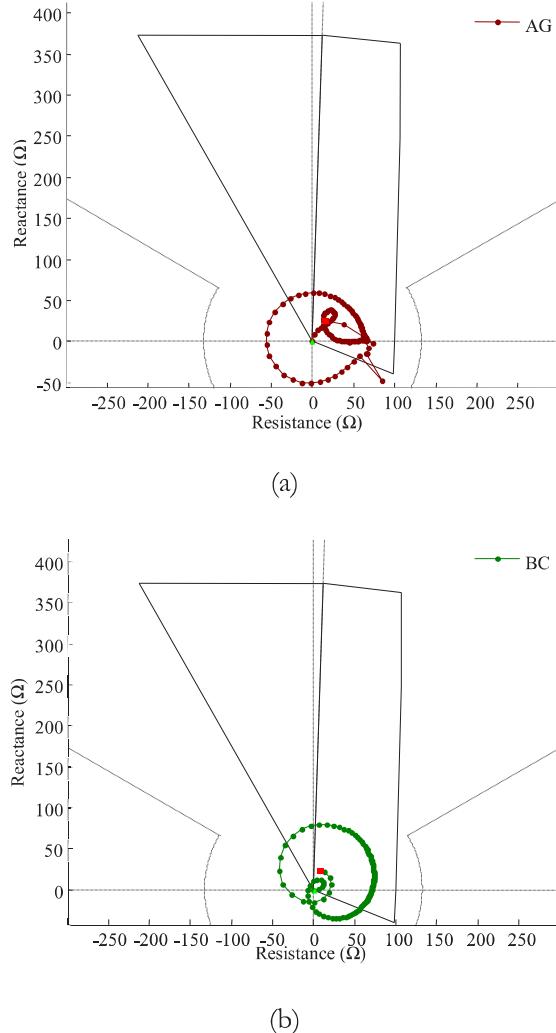


Figure 8. Apparent impedances calculated by the measuring units of the conventional distance relay of the healthy line: (a) AG for AG faults and (b) BC for BC faults

Moreover, the healthy line relay would trip simultaneously for faults along a great part of the faulty line extension, regardless of the fault type.

Table 5 shows the input signals for each measuring unit of the unconventional distance relay [5].

Table 5. Input signals for each measuring unit of the unconventional distance relay

Unit	V_R	I_R	Z_R
AG	$V_a + k_V V_0$	$I_a + 3k_I I_0$	$Z_{C1} \tanh(\gamma_1 x)$
BG	$V_b + k_V V_0$	$I_b + 3k_I I_0$	$Z_{C1} \tanh(\gamma_1 x)$
CG	$V_c + k_V V_0$	$I_c + 3k_I I_0$	$Z_{C1} \tanh(\gamma_1 x)$
AB	$V_a - V_b$	$I_a - I_b$	$Z_{C1} \tanh(\gamma_1 x)$
BC	$V_b - V_c$	$I_b - I_c$	$Z_{C1} \tanh(\gamma_1 x)$
CA	$V_c - V_a$	$I_c - I_a$	$Z_{C1} \tanh(\gamma_1 x)$

The parameters k_V , k_I , k_1 e k_2 are described by the following equations:

$$k_V = k_1 - 1 \therefore k_1 = \frac{\cosh(\gamma_0 x)}{\cosh(\gamma_1 x)} \quad (16)$$

$$k_I = \frac{k_2 Z_{C0} - Z_{C1}}{3Z_{C1}} \therefore k_2 = \frac{\sinh(\gamma_0 x)}{\sinh(\gamma_1 x)} \quad (17)$$

In order that the impedance seen by the unconventional distance protection also result in the positive sequence impedance per km (Z_I) multiplied by the fault distance (x), it is applied the following filter:

$$Z_R^* = \frac{Z_1}{\gamma_1} \tanh^{-1} \left(\frac{Z_R^{NC}}{Z_{C1}} \right) = x Z_I \quad (18)$$

where Z_R^* is the apparent impedance seen by the unconventional distance protection. As k_1 and k_2 depends on the distance to the fault point, which is unknown, in [5] it has been proposed the adoption of constant values for these parameters, calculated considering the fault at the end of the TL. This is an applicable premise for a 645 km line, as k_1 and k_2 do not vary significantly over such distance. However, as evidenced in figure 9, this assumption is not valid for a TL $\lambda/2^+$. A practical solution for the use of such parameters is still needed, since iterative methods would require intense computational effort – which could undermine the effectiveness of the protection scheme.

Distance protection in parallel half

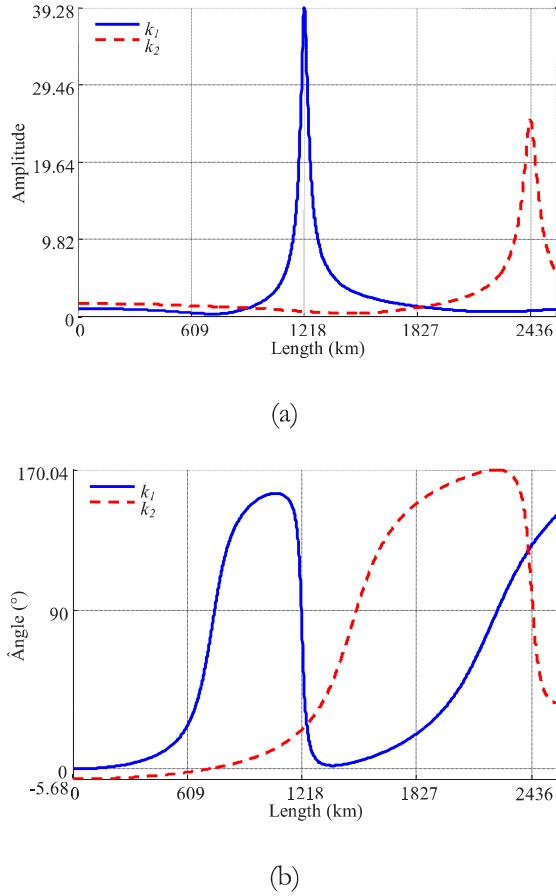
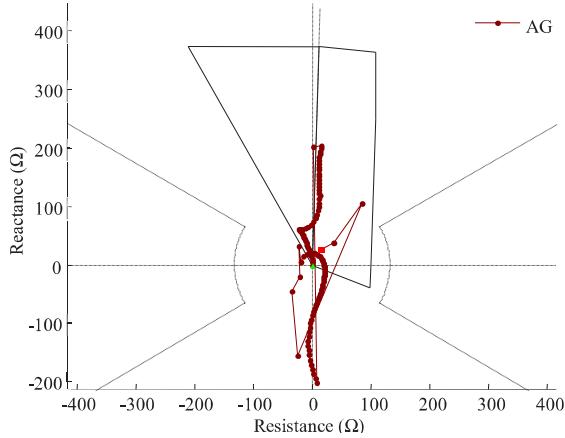
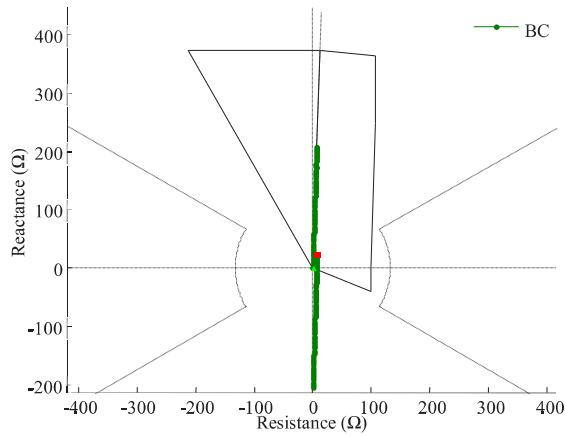


Figure 9. Variation of k_1 and k_2 (a) amplitude and (b) angle along $\lambda/2^+$
The apparent impedances calculated by the AG and BC measuring units of the unconventional distance relays of the faulty and healthy lines for AG and BC solid faults, respectively, are shown in figures 10 and 11. The parameters k_1 and k_2 were calculated for the exact locations of the faults. Figure 12 displays the apparent impedances calculated by the AG unit of the unconventional distance relay of the faulty line for AG solid faults, assuming constant k_1 and k_2 parameters, calculated considering the fault at the end of the TL.



(a)



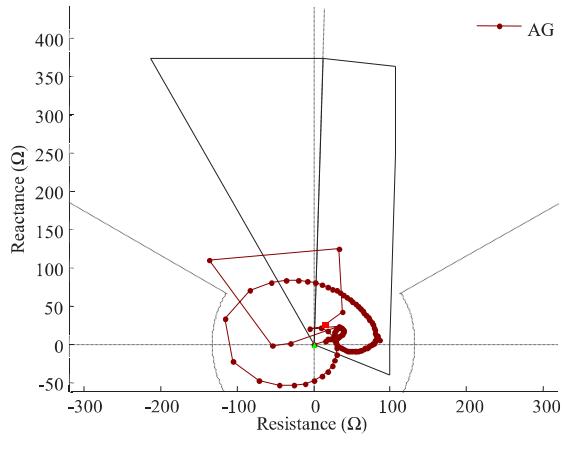
(b)

Figure 10. Apparent impedances calculated by the measuring units of the unconventional distance relay of the faulty line: (a) AG for AG faults and (b) BC for BC faults

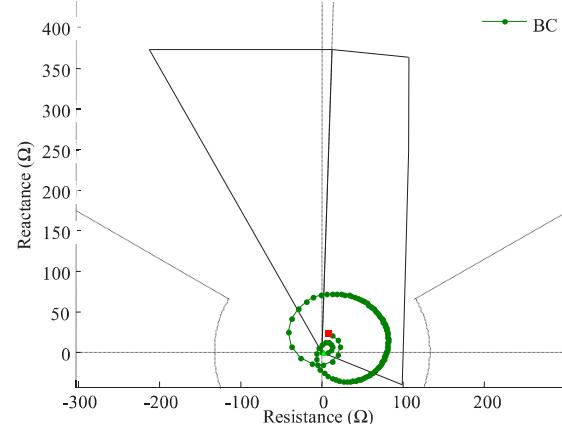
The impedances calculated by the BC unit of the faulty line relay are equal to xZ_1 for faults located up to approximately $\lambda/4$, from where they are displaced in the R-X diagram, which causes the relay to underreach and to overreach. There is an equivalence between the reactances seen for faults located from 0 to 10 and from 180 to 190 electrical degrees, of which the corresponding impedances differ only by resistance deviations of the order of 6 Ω . The impedances calculated by the AG unit of the faulty line relay for AG faults, with exact k_1 and k_2 parameters values, have

Distance protection in parallel half

irregular resistance and reactance displacements in relation to αZ_1 , resulting from the mutual coupling effect, in addition to the discontinuity in $\lambda/4$.



(a)



(b)

Figure 11. Apparent impedances calculated by the measuring units of the unconventional distance relay of the healthy line: (a) AG for AG faults and (b) BC for BC faults

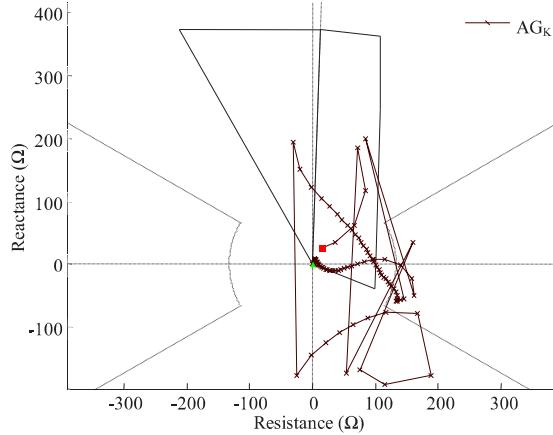


Figure 12. Apparent impedances calculated by the AG measuring unit of the unconventional distance relay of the faulty line for AG faults, assuming constant k_1 and k_2 parameters

It is verified that the unconventional relay of the healthy line would also trip simultaneously for faults along a great part of the faulty line extension, regardless of the fault type.

Assuming constant k_1 and k_2 parameters, calculated considering the fault at the end of the TL, it is found a random behavior for the apparent impedances calculated by the AG unit of the faulty line relay for AG solid faults.

Figure 13 shows the impedances calculated by the BC measuring unit of the faulty line relay for BC solid faults (Z_R) and the TL positive sequence impedance (Z_L), with the scale factor of the axis R (Resistance) increased conveniently.

Distance protection in parallel half

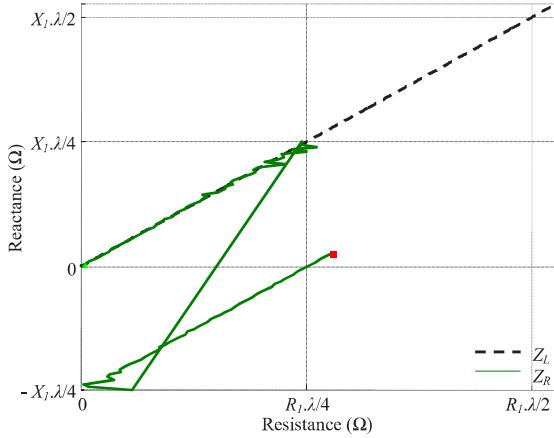


Figure 13. Line positive sequence impedance and apparent impedances calculated by the BC measuring unit of the faulty line relay for BC faults applied along $\lambda/2^+$

It is noticed that the apparent impedances displacement in the R-X diagram occurs for faults applied at points subsequent to a quarter wavelength. In [6] y [7] it has been proposed a method for the identification and correction of such displacement, represented by an error impedance, given by:

$$Z_{error} = R_1 \frac{\lambda}{4} + jX_1 \frac{\lambda}{2} \quad (19)$$

The apparent impedances seen by the unconventional distance relay and the error impedance have been expressed in p.u., having as the base the TL positive sequence impedance:

$$Z_R^{pu} = \frac{Z_R^*}{Z_L} = Re(Z_R^{pu}) + j Im(Z_R^{pu}) \quad (20)$$

$$Z_{error}^{pu} = \frac{Z_{error}}{Z_L} = \Delta r + j \Delta i \quad (21)$$

Figure 14 shows the variation of the real and imaginary parts of the p.u. impedances calculated by the BC measuring unit of the faulty line relay for BC solid faults along $\lambda/2^+$

Both the p.u. resistance and the p.u. reactance are displaced for faults at points subsequent to $\lambda/4$, having the p.u. reactance minimal variation for faults applied along the anterior and posterior parts to the displacement point, with distinct values for each part. That said, the strategy proposed in [6] y [7] consists of to compare the

magnitude of the imaginary part of Z_R^{pu} with half the value of the imaginary part of Z_{error}^{pu} , adding the error impedance to the apparent impedance seen by the

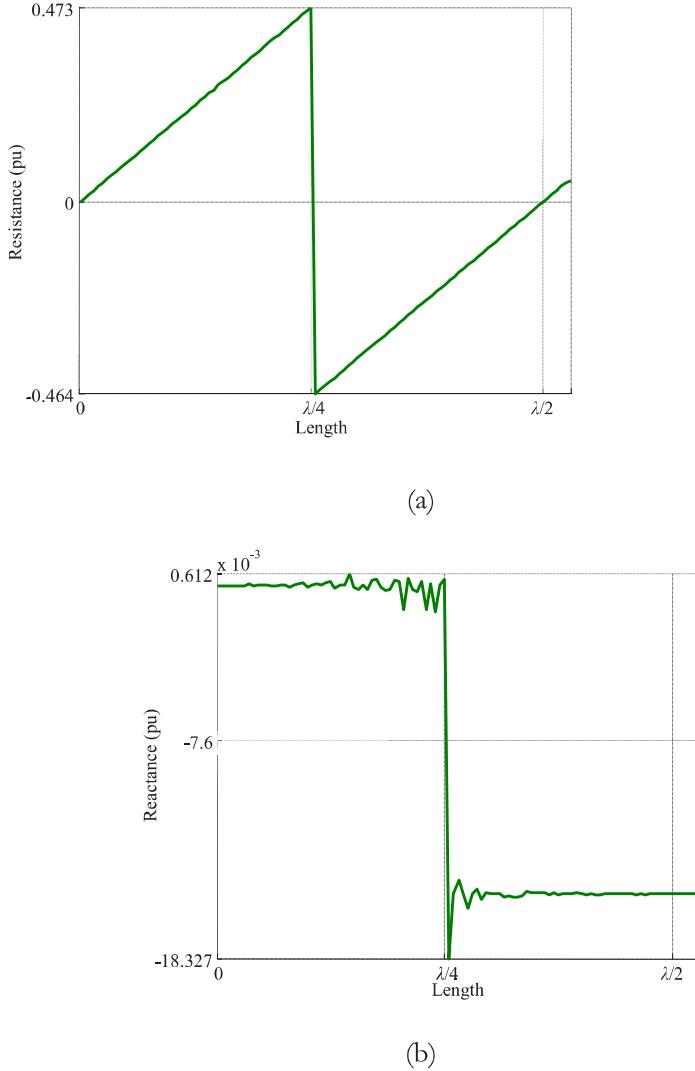


Figure 14. Variation of the (a) real and (b) imaginary parts of the p.u. impedances calculated by the BC unit of the faulty line relay for BC faults

Unconventional distance relay when the former is greater or equal to the latter:

$$Z_R^{**} = \begin{cases} \left| Im(Z_R^{pu}) \right| < 0.5\Delta i \rightarrow Z_R^* \\ \left| Im(Z_R^{pu}) \right| \geq 0.5\Delta i \rightarrow Z_R^* + Z_{error} \end{cases} \quad (22)$$

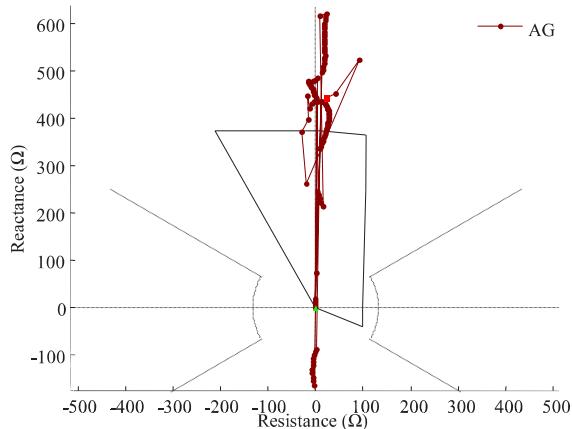
Distance protection in parallel half

where Z_R^{**} is the apparent impedance seen by the corrected unconventional distance protection relay.

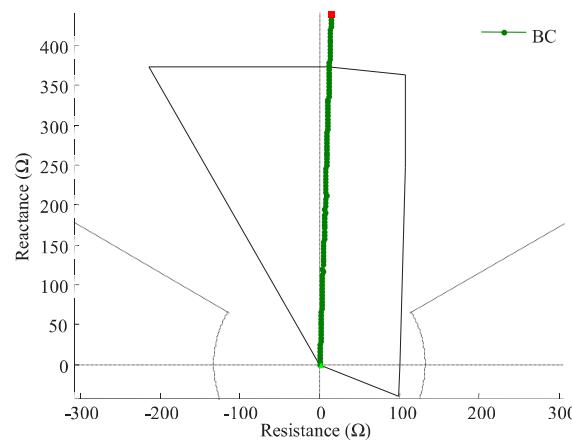
In order to evaluate the influence of the electromagnetic coupling between parallel TLs $\lambda/2^+$ on such correction method, in figures 15 and 16 are displayed the apparent impedances calculated by the AG and BC measuring units of the corrected unconventional distance protection relays of the faulty and healthy lines for AG and BC solid faults, respectively (exact k_1 and k_2 parameters values).

The discontinuity in $\lambda/4$ is properly corrected for the apparent impedances calculated by the BC measuring unit of the faulty line relay. However, because of the resistance deviation resulting of the influence of the zero sequence mutual coupling, apparent impedances

calculated by the AG



(a)



(b)

Figure 15. Apparent impedances calculated by the measuring units of the corrected unconventional distance protection relay of the faulty line: (a) AG for AG faults and (b) BC for BC faults

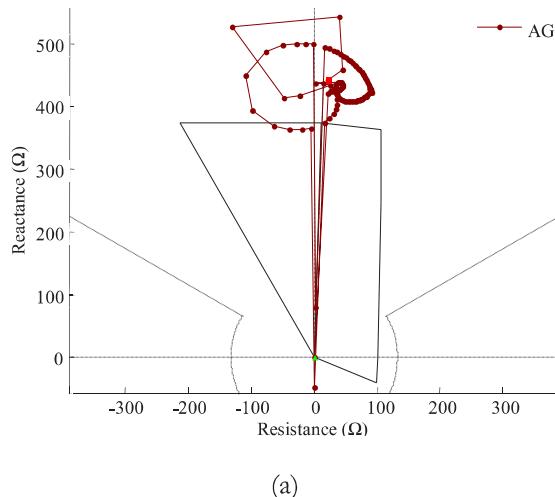
measuring unit of the faulty line relay for AG solid faults within parts of the first quarter-wave are moved out of the operation characteristic, while within parts of the second quarter-wave are not corrected, in both cases undermining the effectiveness of the protection scheme.

The apparent impedances calculated by the AG and BC measuring units of the healthy line relay for AG and BC solid faults, respectively, applied along significant parts of the faulty line are moved out of the operation characteristic – what is desirable. However, impedances having minimum resistance deviations in relation to Z_L are not corrected, besides impedances seen for faults at specific points remain in the operation characteristic even with such displacement.

Figure 17 shows the variation of the imaginary parts of the p.u. impedances calculated by the AG measuring unit of the faulty line relay for AG solid faults along $\lambda/2^+$.

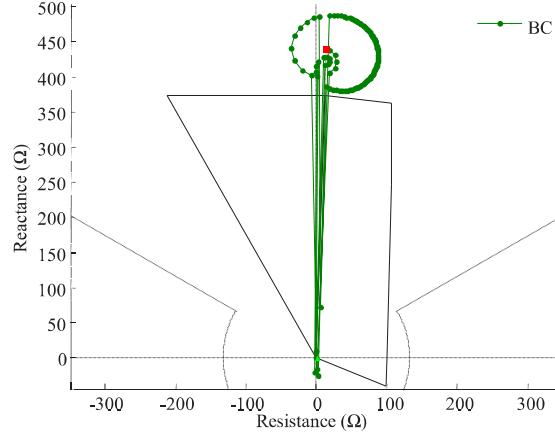
Since $0.5 \Delta i$ is equal to 0.0076 p.u., apparent impedances of which $|X_{R^{pu}}|$ is greater than such value are corrected, including impedances seen for faults within the first quarter-wave and excluding impedances seen for faults within the second quarter-wave, inappropriately.

The complex function $\tanh^{-1}(z)$ is given by:



(a)

Distance protection in parallel half



(b)

Figure 16. Apparent impedances calculated by the measuring units of the corrected unconventional distance protection relay of the healthy line: (a) AG for AG faults and (b) BC for BC faults

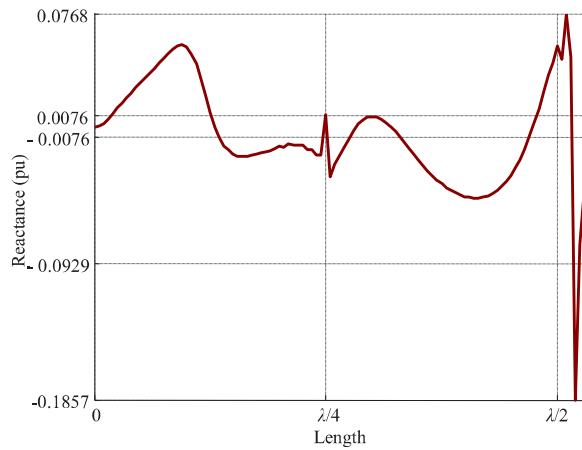


Figure 17. Variation of the imaginary parts of the p.u. impedances calculated by the AG measuring unit of the faulty line relay for AG faults along $\lambda/2^+$

$$\tanh^{-1}(z) = \frac{1}{2} [\ln(1+z) - \ln(1-z)] \quad (23)$$

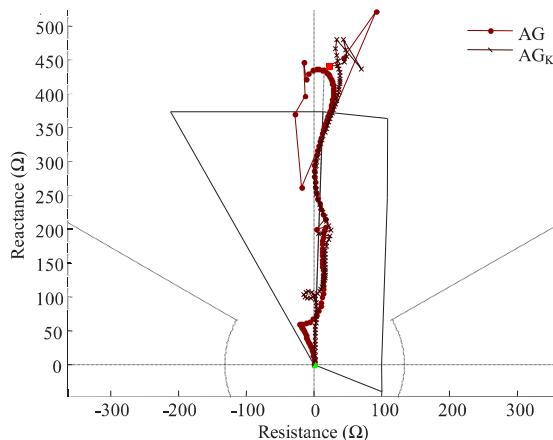
where

$$\ln(z) = \ln|z| + i \arg(z) + i2\pi k_{ln} \quad (24)$$

$$k_{ln} = \dots -2, -1, 0, 1, 2, \dots \quad (25)$$

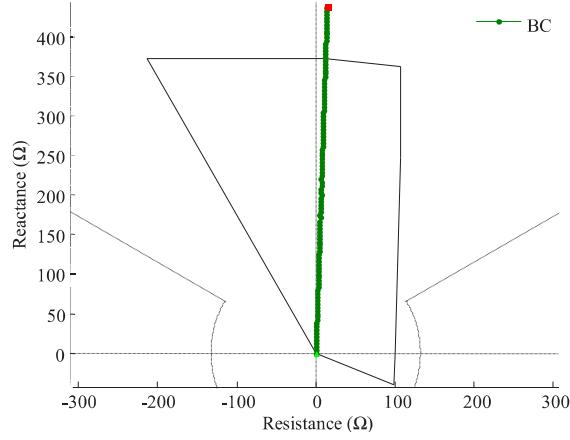
According to [18], the apparent impedances discontinuity in $\lambda/4$ is due to the fact that various softwares use the convention $\arg(\tilde{z}) \in (-\pi; \pi]$. If it were adopted $\arg(\tilde{z}) \in (0; 2\pi]$, such discontinuity would not occur. Thus, it is possible to determine the k_{ln} value in order to obtain an equivalence between the apparent impedances and xZ_1 for faults along the entire line length.

Setting k_{ln} equal to 1 in the cases of displaced apparent impedances, calculating the parameters k_1 and k_2 for the exact locations of the faults and assuming these parameters constant, calculated considering the fault at 60 electrical degrees from the sending end (AG_K curve), in Figure 18 are displayed the apparent impedances calculated by the AG and BC measuring units of the unconventional distance relay of the faulty line for AG and BC solid faults, respectively.



(a)

Distance protection in parallel half



(b)

Figure 18. Apparent impedances calculated by the measuring units of the unconventional distance relay of the faulty line: (a) AG and AG_K for AG faults and
 (b) BC for BC faults

Acceptable performances are obtained even for cases of constant k_1 and k_2 parameters, leading to the inference that the unconventional distance protection could be directly applied to parallel TLs $\lambda/2^+$, with the use of an appropriate fault identification selection logic. Nevertheless, the use of constant k_1 e k_2 parameters makes the protection scheme sensitive to the pre-fault loading and to the source impedance ratio (SIR), besides being considerably sensitive to the fault point determined in the calculation of such parameters, and is therefore not recommended. Setting k_{\parallel} equal to 1 in the cases of displaced impedances, in Figure 19 are shown the apparent impedances calculated by the measuring units of the unconventional distance relay of the faulty line: AG and AG_K (k_1 and k_2 parameters assumed constant, calculated considering the fault at 60 electrical degrees from the sending end) for AG faults with fault resistance (R_F) equal to 50 Ω and BC for BC faults with R_F equal to 10 Ω .

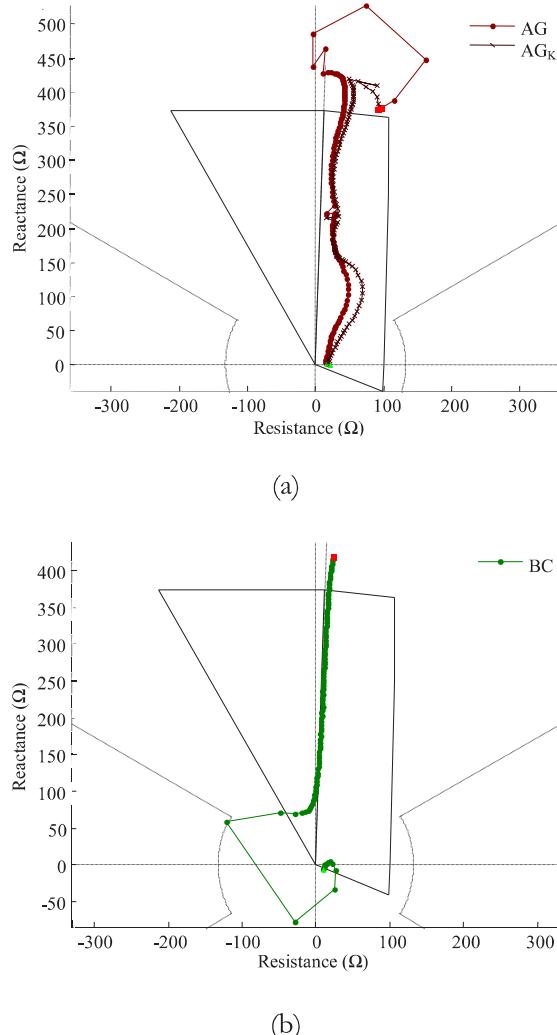


Figure 19. Apparent impedances calculated by the measuring units of the unconventional distance relay of the faulty line: (a) AG and AG_K for AG faults with $R_F = 50 \Omega$ and (b) BC for BC faults with $R_F = 10 \Omega$

Acceptable performances are obtained for the cases of AG faults, however, for BC faults, BC measuring unit underreaches a line section close to the sending end, what undermines the effectiveness of the protection scheme.

Figure 20 exposes the apparent impedances calculated by the AG measuring unit of the unconventional distance relay of the faulty line (exact k_1 and k_2 parameters values), considering $I_{R^F} = I_a^F + 3k_1I_{a0}^F + k_mI_{a0}^H$, for AG solid faults.

Distance protection in parallel half

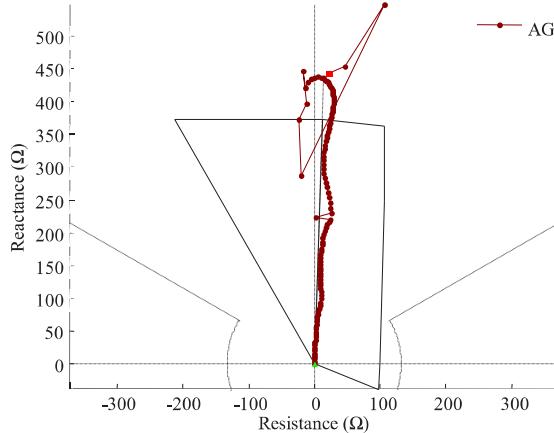


Figure 20. Apparent impedances calculated by the AG measuring unit of the unconventional distance relay of the faulty line, with zero sequence mutual impedance compensation, for AG solid faults

Reduced deviations are obtained for the apparent impedances in relation to those seen in Figure 18a, primarily for impedances seen for faults within the first quarter-wave – being the remaining deviations due to the zero sequence mutual admittance, not compensated. The development of a protection strategy that takes into account both the mutual impedance and the mutual admittance between parallel TLs may have good applicability for long lines.

CONCLUSIONS

This work presented an analysis of the influence of the zero sequence mutual coupling between parallel transmission lines $\lambda/2^+$ on the performance of the unconventional distance protection.

Due to the resistance deviation caused by the influence of the electromagnetic coupling, the suggested correction method proved unsatisfactory even for AG solid faults. Assuming that such discontinuity is due to the range adopted in various softwares for the argument of a complex number, the use of the unconventional distance protection proved to be feasible, nevertheless, by varying the fault resistance, it was noted a underreach of the BC measuring unit for BC solid faults applied nearby the sending end of the faulty line, what undermines the effectiveness of the protection scheme.

It was also shown that the compensation of the zero sequence mutual impedance leads the apparent impedances to reduced deviations in relation to xZ_l . Some suggestions for future researches are:

- develop an efficient solution for the use of k_1 and k_2 parameters;
- evaluate the influence of the errors related to phasor estimation on the results;

- evaluate the influence of the corona effect on the results;
- propose an effective and efficient protection scheme for parallel TLs $\lambda/2^+$.

ACKNOWLEDGMENT

This work was financially supported by Capes Foundation, in Brazil.
The author gratefully acknowledges Professor Clever Pereira, for the orientation.

REFERENCES

- [1] Portela, C. y M. Alvim. 2007. “Soluções não convencionais em CA adequadas para transmissão a distância muito longa: uma alternativa para o sistema de transmissão da Amazônia”, Transmissão de Energia Elétrica a Longa Distância, Recife, Policonsult, pp. 1 - 30.
- [2] Prabhakara, F. S.; K. Parthasarathy y H. N. Ramachandra Rao. 1969. “Analysis of natural half-wave-length power transmission lines”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 88, No. 12, pp. 1787 - 1794.
- [3] Dias, R. 2008. “Derivação ou injeção de energia em uma linha de transmissão de pouco mais de meio comprimento de onda por dispositivos de eletrônica de potência”. Tesis Doctoral. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil.
- [4] Küsel, Bernard F. 2014. “Proteção de linhas de transmissão com pouco mais de meio comprimento de onda”. Tesis de Maestría. Universidade de Brasília, Brasil.
- [5] Xu, Z. Y.; S. F. Huang; Li Ran; J. F. Liu; Y. L. Qin; Q. X. Yang y J. L. He. 2008. “A distance protection relay for a 1000-kV UHV transmission line”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 23, No. 4, pp.1795 - 1804.
- [6] Küsel, Bernard F.; Felipe V. Lopes y Kleber M. Silva. 2013. “Proteção de distância não convencional aplicada às linhas de transmissão com pouco mais de meio comprimento de onda”, Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Cigré-Brasil, pp. 1 - 9.
- [7] Küsel, Bernard F. 2015. Felipe V. Lopes y Kleber M. Silva: “Unconventional distance protection in half-wavelength transmission lines”, International Conference on Power Systems Transients, IPST, pp. 1 - 7.
- [8] Fuchs, R. D. 1997. *Transmissão de energia elétrica: linhas aéreas*. LTC, Rio de Janeiro.
- [9] Hubert, F. J. y M. R. Gent. 1965. “Half-wavelength power transmission lines”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 84, No. 10, pp. 965 - 974.
- [10] Dias, Robson; Antonio Lima; Carlos Portela y Maurício Aredes. 2011. “Extra long-distance bulk power transmission”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 26, No. 3, pp.1440-1448.
- [11] General Electric Company. 1982. *Transmission line reference book: 345 kV and above*. Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA.
- [12] Operador Nacional do Sistema Elétrico. ONS - Sistema interligado - conf. jun/2014 versión 22/08/2014 - BR1406A.ANA.

Distance protection in parallel half

- [13] Pereira, C. 2015. *Redes elétricas no domínio da frequência: técnicas de análise, modelos de componentes, técnicas computacionais*. Artliber, São Paulo.
- [14] Kang, Ning y Yuan Liao. 2012. “Equivalent PI circuit for zero-sequence double circuit transmission lines”, Power and Energy Society General Meeting, IEEE, pp. 1 - 6.
- [15] Pereira, C. 2013. “Proteção de distância,” 05 aug. 2013, 09 dic. 2013, 90 pp., Notas de la Conferencia.
- [16] Siemens. 2011. SIPROTEC: distance protection 7SA6, Nürnberg.
- [17] Martins, A. F. 2014. “Filosofia e critérios para ajuste de proteção de linhas de transmissão com base em um caso real”. Monografia. Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil.
- [18] Fabián E., Renzo G. y M. C. Tavares. 2015. “Distance protection for half wavelength transmission lines”, International Conference on Power Systems Transients, IPST, pp. 1 - 6.

Correspondencia

Marcos Roberto de Araújo
marcosraraudo@ufmg.br