ilustrando la gran variedad de canales disponibles para construir confianza en modelos de dinámica de sistemas. El subconjunto de "pruebas centrales" está formado por todas las de estructura ya que ésta es la parte intrínsecamente fundamental de construcción del modelo.

Completamente explotadas, por una multiplicidad de evaluadores, las pruebas disponibles deberían permitir el desarrollo de modelos útiles en los que haya confianza ampliamente compartida.

A pesar de que podría no ser posible o efectivo en costo conducir todas las pruebas, la existencia de una amplia variedad incrementa la probabilidad de que más pruebas sean conducidas y de que muchas personas puedan estar involucradas en el proceso completo de validación. Una de sus características fundamentales es que virtualmente todas ellas pueden ser conducidas o entendidas por un usuario, no técnico, del modelo; ninguna requiere técnicas matemáticas o computacionales que no puedan ser fácilmente explicadas. La accesibilidad del proceso de verificación global es crucial para el éxito.

La validación es el proceso de establecer confianza en la validez y utilidad de un modelo. La noción de validación

como equivalente a confianza entra en conflicto con el concepto de verdad absoluta. No hay método para probar que un modelo es correcto. La teoría de la relatividad de Einstein no ha sido probada como correcta, se establece porque no ha sido desaprobada y por que hay confianza compartida en su utilidad.

La validez como significado de confianza en la utilidad de un modelo es un concepto inherentemente relativo: siempre debe seleccionarse entre modelos competentes, y éstos sólo pueden ser evaluados con relación a un propósito particular. Es inútil tratar de establecer si un modelo particular es válido sin especificar para qué propósito va a ser usado.

La experiencia ha mostrado repetidamente que los debates sobre los méritos relativos de diferentes modelos son frecuentemente irresolubles si el propósito de aplicación no ha sido claramente establecido.

PRUEBAS DE LA ESTRUCTURA DEL MODELO. Evalúan la estructura y los parámetros, directamente sin examinar las relaciones entre estructura y comportamiento. Seguidamente son citadas.

- Prueba de verificación de la estructura: Compara la estructura del modelo directamente con la del sistema real. Es más fácil verificar que la estructura de un modelo está presente en el sistema real que establecer que las estructuras más relievantes para el propósito del modelo han sido seleccionadas del sistema real.

- Prueba de verificación de parámetros. Sus valores son verificados con observaciones del sistema real, tal como la estructura lo es con el conocimiento disponible, para ver si se corresponden conceptual y numéricamente. Ambas pruebas están interrelacionadas, su objetivo es describir el real proceso de toma de decisiones. En muchos casos, la línea divisoria entre parámetros y variables es fluida, depende del propósito y horizonte de tiempo del modelo.

- Prueba de condiciones extremas. La estructura en modelos de dinámica de sistemas debe permitir combinaciones extremas de niveles (variables de estado). Si el conocimiento acerca de las condiciones extremas es incorporado, el resultado es casi siempre un modelo mejorado en la región de operación normal.

El éxito en esta prueba induce a desarrollar confianza en la habilidad del modelo para comportarse plausiblemente dentro de un amplio rango de condiciones y por lo tanto incrementa su utilidad para explorar políticas que muevan el sistema fuera de los rangos históricos de comportamiento.

- Prueba de adecuación de límites (estructura): Considera las relaciones estructurales necesarias para satisfacer el propósito del modelo. Pregunta si su agregación es apropiada y si incluye toda la estructura relievante.

- Prueba de consistencia dimensional: Análisis dimensional de las ecuaciones.

- Otras pruebas: Actualmente existe un amplio acuerdo sobre las limitaciones de las pruebas estadísticas para la estructura del modelo. Estas podrían ser útiles para descubrir posibles fallas estructurales pero deberían ser reforzadas por las anteriores pruebas, aquí citadas, antes de que las suposiciones del modelo sean alteradas.

PRUEBAS DE COMPORTAMIENTO DEL MODELO. Evalúan la adecuación de la estructura a través del Análisis del comportamiento por ella generado.

- Prueba de reproducción del comportamiento: Examina la bondad del ajuste entre el comportamiento generado por el modelo y el observado en el sistema real.

- Prueba de predicción del comportamiento. Es análoga a la reproducción del comportamiento. Aunque no se requiere una predicción puntual exacta, el modelo debe proyectar la forma cualitativa de su patrón de comportamiento futuro.

- Prueba de anomalía de comportamiento. El comportamiento anómalo debe ser rastreado hasta los elementos de la estructura considerados responsables de él; frecuentemente se encuentran así obvias fallas en las suposiciones subyacentes.

- Prueba de miembro de familia. Se interesan en porqué un miembro particular de la clase difiere de los otros. El modelo es una teoría general; su estructura es la de una clase entera. Los casos especiales son materializados en los parámetros.

- Prueba de comportamiento sorpresivo. Después de entender las causas en el modelo que conducen a un comportamiento sorpresivo, se compara tal comportamiento -y sus causas- con el del sistema real. Cuando este procedimiento lleva a la identificación de un comportamiento no reconocido previamente en el sistema real, se incrementa la confianza en la utilidad del modelo y deben revisarse los datos.

- Prueba de política extrema: Alterar una sentencia de política (ecuación de tasa) en una forma extrema y correr el modelo para determinar las consecuencias dinámicas.

- Prueba de adecuación de límites (comportamiento). Considera si un modelo incluye la estructura necesaria para producir las salidas para las que fue diseñado.

- Prueba de sensibilidad de comportamiento: Analiza el impacto del comportamiento ante diferentes valores de los parámetros.

PRUEBAS DE IMPLICACIONES DE POLITICA. Examina la robustez de las implicaciones de política cuando se hacen cambios en los límites o en los parámetros.

- Prueba de mejora del sistema: Llega a ser la prueba decisiva pero sólo cuando repetidas aplicaciones al sistema real llevan abrumadoramente a la conclusión de que el modelo señala el modo para políticas mejoradas.

- Prueba de predicción de comportamiento cambiado.

- Prueba de adecuación de límites (política): Examina como la modificación de límites del modelo alteraría sus recomendaciones de política.

- Prueba de sensibilidad de política: Puede ayudar a mostrar el riesgo en adoptar un modelo para hacer política debido a la influencia de la incertidumbre en los valores de los parámetros.

2.5 ANALISIS DE LA PROBLEMATICA

En la comunidad de la dinámica de sistemas -respecto al objeto de la ciencia- existe amplio consenso acerca de la

importancia de las explicaciones causales, las cuales utilizan enunciados universales o leyes de la naturaleza acompañadas de condiciones iniciales. Para que estas explicaciones no sean ad-hoc se tendrá que disponer de una gran cantidad de consecuencias contrastables.

Algunas características propias de esta metodología que no son frecuentemente explícitas ni reconocidas por sus críticos son, entre otras, el principio de causalidad o la búsqueda de leyes universales, la insistencia en explicaciones endógenas, el entendimiento como una base para revisar la estructura del modelo la cual exige que todos los errores sean explicados para proteger las teorías contra ajustes ad-hoc.

Las teorías científicas no son enteramente justificables o verificables pero sí pueden ser contrastables o corroborables. Han de elegirse las que comparativamente sean más aptas para salir indemnes de las contrastaciones, las que por selección natural demuestren ser más fuertes en la lucha por la supervivencia. Las preferibles serán aquellas de contenido lógico más fuerte y rico, de mayor grado de universalidad y precisión, de mayor poder explicativo y predictivo.

La dinámica de sistemas posee métodos específicos para ayudar a desarrollar teorías altamente corroboradas. La refutabilidad exige exponerlas al posible error empírico mediante una variedad de pruebas que constituyen puntos de contacto entre la teoría y la realidad.

La pretendida objetividad científica de las teorías y las pruebas objetivas contra la realidad sin incluir las preconcepciones del investigador son sustituidas en esta escuela de modelamiento cambiando el énfasis de una concepción abstracta de su verdad o falsedad por la utilidad del modelo para cumplir un propósito específico.

El concepto de validación es inherentemente relativo, no hay método para probar que un modelo es correcto. Debe seleccionarse entre varios modelos competentes los cuales sólo pueden evaluarse con respecto a su propósito.

El procedimiento de validación de etapas múltiples, Naylor & Fingers (1967), es recomendable ya que incorpora una interacción entre las tres concepciones filosóficas relacionadas con la validación nominal de la estructura interna; la verificación empírica -cuando sea posible- de las correspondientes hipótesis, suposiciones y parámetros; y la prueba de la capacidad predictiva del

modelo. La refutación empírica de un aspecto generalmente no conduce a su rechazo a menos que se encuentre disponible un mejor modelo o hipótesis; normalmente se procede a su redefinición o refinamiento.

Las 17 pruebas presentadas por Forrester & Senge (1980), además de ser potentes herramientas para incrementar la confianza en la utilidad del modelo, son fáciles de entender y de aplicar aún para personal no técnico; sin embargo parecen no haber sido lo suficientemente explotadas.

Aracil (1986) sugiere algunas innovaciones metodológicas tales como los métodos analíticos, la teoría cualitativa de las ecuaciones diferenciales y el análisis cualitativo de los modelos de dinámica de sistemas. Las técnicas propuestas no se adaptan satisfactoriamente al paradigama de dinámica de sistemas.

La estimación de parámetros en esta metodología presenta un dilema: La estructura y los parámetros deben ser formulados de una manera agregada pero la estimación de tales parámetros se recomienda hacer a partir de datos desagregados. Si los parámetros tienen poco significado en el sistema real, durante su proceso de estimación

deberá enfatizarse sobre aspectos del modelo mental más que sobre el reporte de observaciones originadas de los participantes en el sistema.

Para ayudar a superar este dilema puede ser recomendable la re-estructuración del modelo, no sólo desagregando algunos niveles en otros más elementales sino también mediante la adición explícita de ciclos, con lo cual es posible que algunos parámetros -con valores constantes- se conviertan en variables con un grado de agregación cercano al observable.

El análisis de sensibilidad es fundamental para evaluar los efectos de la incertidumbre y para determinar los parámetros cuya estimación más rigurosa es necesaria, entre otros. Sin embargo, para su elaboración, son presentadas muy pocas guías prácticas.

El modelo mental y su importancia para la formulación de la estructura interna del modelo formal son considerados puntos cruciales dentro de esta metodología. Para la elaboración de buenos modelos de dinámica de sistemas, parece insuficiente cualquier insistencia sobre estos aspectos.

En la búsqueda de una mayor solidez para la metodología de dinámica de sistemas, que intente alcanzar la exactitud de los modelos -no sólamente su precisión- para hacer sus resultados más confiables y útiles, no debería descartarse la incorporación de herramientas matemáticas y/o estadísticas más rigurosas, tales como, los métodos analíticos, métodos de análisis cualitativo y técnicas para la extracción del conocimiento a los expertos.

Adicionalmente, es necesaria la inclusión de otros aspectos como la estimación dinámica de parámetros, la validación prospectiva de los modelos y la componente de incertidumbre, la cual ha sido muy débilmente tratada en este contexto; es notable la escasez del trabajo adelantado a este respecto durante las recientes décadas. Los últimos tres aspectos son los que se pretenden abordar durante el desarrollo de este trabajo.

La trayectoria seguida por un sistema depende tanto de su estructura ordenada para la cual pueden suponerse reglas aproximadas de comportamiento como del ruido que aparece en todas las funciones de decisión y acerca del cual sólo se sabe de su existencia y quizá de sus órdenes de magnitud pero para el cual no se tiene una hipótesis causal satisfactoria.

Forrester (1961) establece que dos modelos idénticos pero con diferentes secuencias de ruido son distintos en detalle y el uno no puede servir como un predictor útil para el otro, sin embargo ambos modelos parecen pertenecer a la misma familia de comportamiento cualitativo y pueden utilizarse para el perfeccionamiento de sistema mediante los cambios de diseño.

La inclusión de algunas de las citadas innovaciones podría contribuir a la consolidación de la dinámica de sistemas y a la mayor confiabilidad de los modelos construidos mediante esta importante metodología de modelamiento, la cual tiene profundas y fecundas raices filosóficas y presenta una concepción realista como método práctico para la solución de problemas del mundo real.

3. MARCO TEORICO

La dinámica de sistemas puede considerarse como una metodología de simulación continua aplicable al estudio de sistemas dinámicos. Los modelos, mediante ella construidos, establecen interacciones entre las componentes del sistema conformando ciclos de realimentación.

Adicionalmente, la dinámica de sistemas considerada como una metodología de modelamiento, pretende incorporar en forma explícita la estructura del sistema, sus objetivos y reglas de política, el proceso de toma de decisiones y las demoras ocasionadas en su implantación y en la ejecución de las acciones recomendadas. Considera, además, las amplificaciones en las fluctuaciones de algunas variables, ocasionadas por su comportamiento interno ante ciertos ingresos exógenos que pueden servir como prueba para el sistema. De las interacciones internas del sistema será posible el estudio de su estabilidad y desarrollo.

Las principales bases en las que se fundamenta la Dinámica de Sistemas son la teoría de servomecanismos ó sistemas de información con retroalimentación, la comprensión de la estructura del proceso de toma de decisiones, la teoría general de sistemas, el enfoque de simulación para Análisis de sistemas complejos y la potencia de los sistemas computarizados.

Las características más notables en el uso de la metodología de Dinámica de Sistemas son citadas a continuación.

- El enfoque sistémico ó integral centrado en la estructura de los ciclos de realimentación de información, los cuales posibilitan el adecuado Análisis de la reacción del sistema ante una excitación ó perturbación externa. Se analizan todas las variables al mismo tiempo, en forma diferente del tratamiento estadístico tradicional donde las variables son, generalmente, analizadas individualmente o por pequeños subgrupos.

- El carácter dinámico del sistema según el cual el comportamiento en una de las componentes es reflejado en

el sistema global, las componentes no son independientes entre sí sino que interactúan de una manera dinámica y realista afectando el comportamiento del sistema como un todo.

- El tratamiento de las demoras se realiza de una manera distribuida; los efectos de un cambio en las políticas ó en las decisiones, a menudo no se reflejan en el sistema de una manera instantánea sino por el contrario, sus efectos se distribuyen en el tiempo de diferentes maneras. El cambio va siendo asimilado por el sistema y el decisor no debe perder el control sobre éste en ningún momento.

- Las limitaciones en la información histórica pueden ser sustituidas mediante un detallado Análisis y conocimiento técnico del sistema, además de la formulación de hipótesis inteligentes acerca de su comportamiento para lo cual son vitales la creatividad, la inteligencia y la imaginación. Puede usarse todo tipo de información disponible, incluyendo las anécdotas, las experiencias personales o de testigos y la información subjetiva.

- Las no linealidades suelen ser incluidas en el modelo a través de funciones de tabla. Cuando no se dispone de

información suficiente puede procederse a la prueba de los tres casos más simples: la alternativa más favorable, la más desfavorable y la más posible. A partir de estimaciones para los valores extremos, las pendientes y el punto normal, las funciones de tabla permiten el ajuste de una curva suave a través de ellos.

- La simulación del sistema, mediante esta metodología, pretende conocer su comportamiento no con la finalidad de extrapolar las tendencias del pasado hacia el futuro sino con el propósito de intervenirlo. Su interés fundamental radica en la transformación del sistema para el cumplimiento de los objetivos planteados por el planificador y por lo tanto son consideradas las políticas alternativas y las posibles acciones a tomar, a la luz de los resultados o respuestas obtenidas a partir del Análisis de los distintos escenarios.

Esta metodología de modelamiento es considerada como una herramienta adecuada para la planificación de sistemas, ya que trata de anticipar sus posibles comportamientos ante cambios introducidos en sus condiciones actuales y permite la construcción de escenarios mediante variaciones en las políticas y los mecanismos de toma de decisiones. El interés fundamental recae en la

planificación y el control del sistema, por lo tanto el gran esfuerzo estadístico dedicado a la consecución de datos históricos puede no justificarse, aunque no se descarta su utilidad. Se trata de recoger las tendencias, las ciclicidades y la oscilaciones de sus componentes y de reconocer los modelos de estabilidad e inestabilidad del sistema reproduciendo sus picos y valles.

Los métodos de simulación son adecuados cuando los problemas no están bien estructurados y no existen criterios claros y explícitos de optimalidad, cuando la solución analítica no es simple. En estos casos se intenta el encuentro de fórmulas que representen el funcionamiento del sistema más que el hallazgo de la solución óptima.

La Filosofía de la Dinámica de Sistemas pretende, más que la solución del problema, el establecimiento de un modelo apropiado, el cual exige profundizar los Análisis sobre las relaciones entre componentes del sistema, las variables más significativas, las formulaciones de política y los mecanismos de toma de decisiones, y las demoras asociadas con la maduración de las ideas y la consecución de los objetivos propuestos.

Buenos modelos de Dinámica de Sistemas exigen ser diseñados con límites bien definidos de tal manera que el comportamiento del sistema pueda ser explicado endógenamente. La estructura interna conformada por los ciclos de realimentación, más que los factores exógenos incontrolados, es asumida como la responsable de posibles comportamientos indeseados.

3.1 LA ESTIMACION DE PARAMETROS.

La estimación de parámetros mediante la utilización de las técnicas estadístico-econométricas supone la disponibilidad de información de buena calidad; en este caso los parámetros reflejan el comportamiento pasado y posiblemente presente del sistema; en las proyecciones subyace implícitamente el supuesto de condiciones que prevalecerán en el futuro.

La estimación técnico-económica de los parámetros se basa en proyecciones hacia el futuro realizadas según las expectativas actuales y las prospectivas del comportamiento económico y tecnológico de las variables pertinentes.

Usualmente se fijan los parámetros sobre la base de la información disponible (generalmente consistente en datos desagregados) y se difiere la intensiva recolección de datos y el proceso de estimación hasta que la prueba del modelo revele los parámetros a los que el modelo es sensible.

La Dinámica de sistemas no trata de proyectar el pasado sino de simular la transformación del sistema mediante acciones generadas sobre los aspectos del sistema donde el planificador puede intervenir para buscar el logro de los objetivos planteados. Según las posibilidades deseadas y controladas por el planificador, los parámetros pueden dejar de ser valores fijos y convertirse en variables dinámicas cuyo comportamiento suele estar basado en expectativas, especialmente en los sistemas sociales, tal es el caso de las elasticidades del consumo de energía eléctrica a sus precios o al producto interno bruto.

Los citados parámetros dinámicos deben ser estimados de una manera flexible para poder ajustarse a las condiciones cambiantes del entorno. Después de su estimación preliminar se procede a efectuar un análisis