

Tipo de artículo: Artículo original

Software de monitoreo de puesta en marcha en turbinas de vapor 100MW

Start-up monitoring software for 100MW steam turbines

Diosnel Quiñones Rosales^{1*} 

Luis Vazquez Seisdedos² , <https://orcid.org/0000-0001-5459-2265>

¹ Grupo de Informática. Central Termoeléctrica Antonio Maceo Grajales. diosnel2086@gmail.com

² Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Oriente. E-mail: lvazquez@uo.edu.cu

* Autor para correspondencia: diosnel2086@gmail.com

Resumen

En la actualidad el sistema energético de Cuba demanda mayor eficiencia en la operación de las unidades térmicas. En la central termoeléctrica Antonio Maceo Grajales, se buscan soluciones que permiten ahorrar portadores energéticos y así contribuir a la eficiencia del proceso de generación de energía eléctrica. El tiempo de arranque de la turbina es crucial para el análisis de la eficiencia de la central, por lo que se propone realizar el análisis, diseño, implementación y evaluación de un sistema informático, que contribuya a la optimización del proceso de arranque de una turbina de vapor de 100MW. Para llevar a cabo la propuesta de solución se utilizó como principal tecnología de desarrollo el *Framework Spring 5.2.5*, haciendo uso del lenguaje de programación JAVA con JDK 11.

Palabras clave: turbina, vapor, arranque, optimización, termoeléctrica, energía, spring, java

Abstract

At present, the Cuban energy system demands greater efficiency in the operation of thermal units. At the Antonio Maceo Grajales thermoelectric plant, solutions are being sought that allow saving energy carriers and thus contribute to the efficiency of the electric power generation process. The turbine start-up time is crucial for the analysis of the efficiency of the plant, so it is proposed to carry out the analysis, design, implementation and evaluation of a computer system, which contributes to the optimization of the start-up process of a turbine of steam of 100MW. To carry out the solution proposal, the Spring Framework 5.2.5 was used as the main development technology, making use of the JAVA programming language with JDK 11.

Keywords: turbine, steam, start-up, optimization, thermoelectric, energy, spring, java

Recibido: 05/01/2021

Aceptado: 12/03/2021

Introducción

La puesta en marcha de una unidad generadora en una central termoeléctrica (CTE) agrupa diferentes procesos de gran complejidad, constituyéndose en la operación más importante de su funcionamiento. Este proceso juega un papel fundamental en la eficiencia con que se explota la unidad generadora, destacándose en ello los consumos por



Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo **Atribución 4.0 Internacional** (CC BY 4.0)

arranque, pérdidas durante el arranque y una maniobrabilidad acorde con las exigencias del sistema electroenergético nacional de Cuba.

Los procesos de puesta en marcha tienen normados parámetros desde el encendido de caldera hasta alcanzar los parámetros nominales, teniendo en cuenta las condiciones iniciales específicas que caracterizan tres tipos de arranques fundamentales, en función de la temperatura de los metales de turbina y que son: arranque en estado frío, tibio y caliente. (Rodríguez, 2000)

Existen estudios cubanos de las curvas de arranque (Rodríguez, 2000), obteniendo datos que demuestran el alto consumo de combustible y la importancia de la adecuada operación de las unidades generadoras. En dichos estudios se caracterizan los parámetros nominales que deben tener las unidades de 100 MW y se analizan los resultados obtenidos a partir del monitoreo de los datos, pero no se propone una solución que permita a los operadores simular cambios en los parámetros y predecir cambios en los valores, lo cual sería de gran utilidad para evitar errores de operación.

También existen aplicaciones que se utilizan para la supervisión de los procesos, el diagnóstico y la predicción de eventos (Villavicencio, 2002) (Quintero, 2002), se destaca el sistema de ayuda para el arranque del generador de vapor SIAGEV, que dentro de sus funcionalidades tiene la capacidad de analizar las pruebas y ayuda para el arranque del generador de vapor, utilizando redes neuronales, planeación inteligente, control predictivo, modelado visual y programación basada en componentes. Se han obtenido ahorros de hasta un 25% del tiempo de arranque, permitiéndole a las empresas reducir el costo por concepto de consumo de combustible. La versión actual de este sistema carece de componentes que se adapten a las condiciones de mantenimiento y explotación que existen en las termoeléctricas de Cuba.

En Cuba se aplica el software A330 diseñado para una CTE de 330 MW (Rodríguez, 2010), implementa la modelación de las normativas de operación, permite obtener los gráficos de arranque específicos para cada estado térmico inicial de la unidad y el monitoreo del proceso. Con los datos obtenidos es posible reducir el costo de arranque, el riesgo de averías y el sobreconsumo de combustible. Sin embargo este software no tiene implementadas funciones para la simulación de procesos y no se ha extendido por todas las termoeléctricas.

Por otro lado, es necesario resaltar que el jefe de turno, el operador y sus auxiliares, requieren conocer a fondo el proceso de generación, al igual que el funcionamiento de la gran diversidad de equipos y sistemas con que cuenta una unidad termoeléctrica; incluso deben memorizar mucha de la información que requieren para operar de forma eficiente y segura.



Actualmente, con el desarrollo acelerado de la computación, incluyendo la tecnología de la información y de la inteligencia artificial, es viable la creación de sistemas que proporcionen información confiable y oportuna al personal de operación, para facilitar la toma de decisiones, logrando una operación eficiente, y en cierta medida, independiente de la experiencia del operador. De esta manera, un sistema para ayuda en línea, debe minimizar la cantidad de información que un operador tenga que aprender de memoria, así como evitarle efectuar consultas de manuales mientras opera, o realizar cálculos y estimaciones empíricas, la misión principal del sistema de ayuda es proveer en lo posible esta información.

En los centros de control de la CTE se cuenta con sistemas SCADA que en caso de fallas, permiten monitorear y operar equipos de seccionamiento remotos mediante tele comandos, o en caso de equipos manuales, operan mediante el envío de brigadas directamente al posible punto de falla. La capacidad de respuesta ante fallas o eventos depende directamente del conocimiento y experiencia del operador en turno, este conocimiento y experiencia es adquirido principalmente en el Centro de Control mediante entrenamiento en línea en el trabajo, por lo que no cuentan con la oportunidad de experimentar, analizar y comparar resultados de diversas maniobras.

Teniendo en cuenta las insuficiencias, manifestadas por investigadores y expertos, se llevó a cabo un diagnóstico para determinar el flujo de trabajo del proceso de arranque en el que participaron los operadores y jefes de bloque de la unidad 6 en la central termoeléctrica “Antonio Maceo Grajales” de Santiago de Cuba. Para ello se utilizaron los siguientes medios: análisis de los datos obtenidos a partir de la revisión de los informes de arranque del año 2017 al 2020 y entrevista al 100% de los operadores, jefes de bloque e inspectores de explotación.

Del procesamiento de la información obtenida con el diagnóstico se pudieron develar las siguientes manifestaciones:

- Equipamiento fuera del ciclo de mantenimiento.
- Los operadores no se ajustan correctamente a las curvas de arranque.
- Tiempo de arranque fuera de norma.
- Alto consumo de combustible.

La amplia variedad de posibles estados térmicos iniciales de arranque y variaciones en las condiciones técnicas, unido a las dificultades presentadas durante el proceso, conlleva a incrementos en los tiempos de arranque y sobreconsumos de los diferentes portadores energéticos utilizados.

A partir de las manifestaciones reveladas y teniendo en cuenta la necesidad de mejorar la eficiencia del proceso de arranque en la termoeléctrica, se propone como objetivo de la investigación desarrollar un *software* para la optimización del proceso de arranque de la turbina de vapor de 100MW en la central termoeléctrica Antonio Maceo Grajales.



Materiales y métodos

La turbina de vapor es un motor térmico cíclico rotativo, de combustión externa, que movido por el vapor que le cedan las calderas de recuperación produce energía mecánica. El vapor entra a alta presión y temperatura, transformando una parte de su entalpía en energía mecánica. (Alobaid, 2008)

Este vapor se genera en una caldera, de la que sale en unas condiciones de elevada temperatura y presión. En la turbina se transforma la energía interna del vapor en energía mecánica que típicamente es aprovechada por un generador para producir electricidad.

Los principales componentes de una central eléctrica son:

- Caldera: su función es la de generar el vapor necesario para el funcionamiento de la turbina.
- Turbina: es la encargada de utilizar la energía del vapor de la caldera y transformarla en trabajo útil para mover un generador eléctrico y otra máquina.
- Condensador: se emplea para condensar el vapor que sale de la turbina.
- Bomba: usada para alimentar la caldera con el agua que proviene del condensador.
- Generador: su función es generar energía eléctrica.

Los diferentes tipos de arranque que se definen en la literatura (Rodríguez, 2000) (Villavicencio, 2002) (Quintero, 2002) (Rodríguez, 2010) (García, 2008) obedecen a la temperatura del eje de la turbina de vapor y de las condiciones de presión y temperatura de la caldera. También se tiene en cuenta el tiempo de parada de la turbina, lo que permite calcular la temperatura de los metales en la turbina. (Villavicencio, 2002) (Quintero, 2002)

Estos arranques se clasifican como:

- Arranque en frío: Temperatura de los cilindros de alta presión y media presión $\leq 150^{\circ}\text{C}$. La temperatura de los metales del domo debe ser $\leq 150^{\circ}\text{C}$.
- Arranque en tibio: Temperatura de los cilindros de alta presión y media presión $> 150^{\circ}\text{C}$ y $\leq 450^{\circ}\text{C}$.
- Arranque en caliente: Temperatura de los cilindros de alta presión y media presión $> 450^{\circ}\text{C}$ y $\leq 540^{\circ}\text{C}$. El tiempo de parada de la turbina debe ser menor de 48 horas.

La puesta en marcha de las turbinas de vapor es un proceso complejo que define en gran medida el correcto funcionamiento de la turbina y el éxito en la entrega a tiempo de la energía al sistema eléctrico. La eficiencia con que se ejecute dicho proceso es fundamental para reducir los costos y aumentar la productividad de las unidades generadoras.



Diseño del sistema

El sistema de apoyo al arranque de turbina de vapor de 100 MW, valida los parámetros de los principales procesos que intervienen en el arranque y muestra el cumplimiento de la curva óptima (Rodríguez, 2000). Cuenta con 6 módulos, Seguridad, Gestionar Arranque, Gestionar equipos, Reportes y Alarmas, mediante los cuales se satisfacen un total de 15 requisitos funcionales definidos para el sistema.

Los casos de uso describen como interactúan los actores con el software. Durante esta interacción, un actor genera eventos sobre un sistema, normalmente solicitando alguna operación como respuesta (Pressman, 2010). A partir del análisis de las características que debe tener la solución propuesta se definen para la misma los siguientes actores:

- Usuario: Accede al sistema y una vez autenticado puede acceder a las vistas autorizadas. Se monitoriza el comportamiento de la curva de arranque y se modifican las fases de arranque.
- Jefe de bloque: Gestiona los equipos del bloque, gestiona las causas, efectos y acciones. Es responsable de los reportes y de la toma de decisiones.
- Administrador: Es el responsable de insertar y relacionar las principales variables que se utilizan en el arranque, también gestiona roles y privilegios.

La figura 1 presenta el diagrama de casos de uso del sistema correspondiente a la solución propuesta en el cual se representan 13 casos de uso.

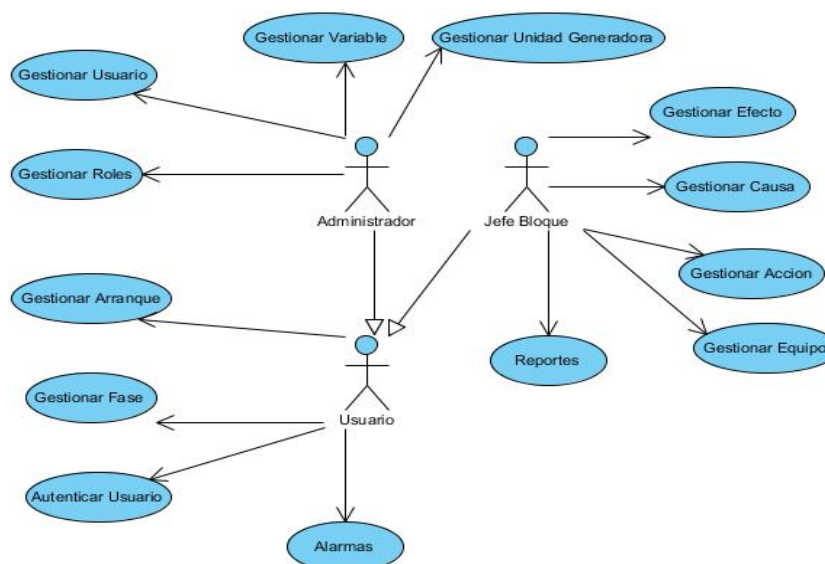


Figura 1. Diagrama de casos de uso del sistema



Herramientas y tecnologías

Para el desarrollo del software se emplea XP como metodología ágil de desarrollo, un proceso que aplica propuestas de gestión ágil (Navarro, 2013) y acelera el proceso de desarrollo en equipos de trabajo pequeños.

Una vez analizadas las tendencias en el desarrollo de Software se definieron las herramientas y tecnologías necesarias para la implementación del sistema, como fueron Spring 5.2.5 como *framework* de desarrollo y utilizando spring-boot-starter 2.2.6.RELEASE, MAVEN 3.6.3 para el manejo de dependencias, JAVA como lenguaje de programación, MySql 5.0.12 como base de datos, Apache Tomcat como servidor web, Thymeleaf como motor de plantillas. Además, se decidió utilizar el entorno de desarrollo SpringToolSuite4.1.1. Para la elaboración de los artefactos correspondientes al diseño, la implementación y el despliegue de la propuesta de solución se definió utilizar la herramienta Visual Paradigm 8.0, haciendo uso del lenguaje de modelado UML en su versión 2.0.

Teniendo en cuenta las condiciones del entorno de trabajo de los usuarios de nuestro sistema, se decide utilizar el módulo Web de Spring, con los artefactos spring-boot-starter-web y spring-boot-starter-web-services.

Arquitectura del sistema

Para el desarrollo de la propuesta de solución se utiliza el modelo Web MVC con conexión a datos utilizando el artefacto JPA, aprovechando las potencialidades ofrecidas por el *framework* Spring.

Spring es un *framework* modular que cuenta con una arquitectura dividida en ocho capas o módulos como se muestra en la figura 2, lo cual permite utilizar las que realmente se necesita en el desarrollo de la aplicación. Para el manejo de las vistas se utiliza el motor de plantillas Thymeleaf, la cual permite añadir atributos y etiquetas a nuestras plantillas, las cuales pueden ser renderizadas localmente y ser reutilizadas por el motor de plantillas.

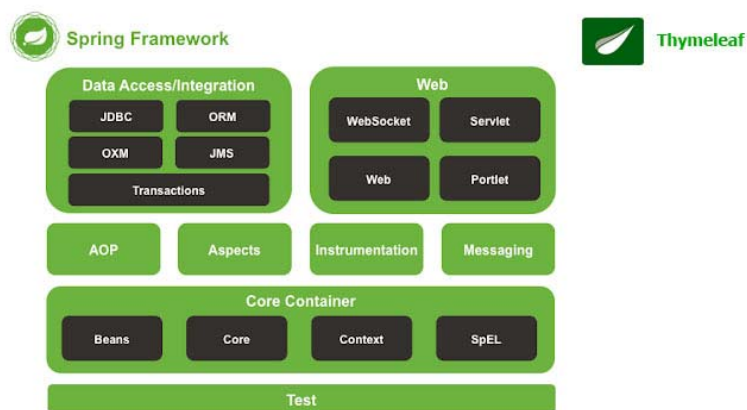


Figura 2. Arquitectura *Framework* Spring



Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo **Atribución 4.0 Internacional** (CC BY 4.0)

Modelo de despliegue

En la figura 3 se muestra el diagrama correspondiente al modelo de despliegue de la propuesta de solución, donde se representan físicamente el servidor WEB y de base de datos, un firewall que garantiza que exista un flujo en un solo sentido desde el área de operación hacia el servidor de base de datos utilizado para el análisis del arranque. En cada relación se especifica el protocolo de comunicación utilizado.

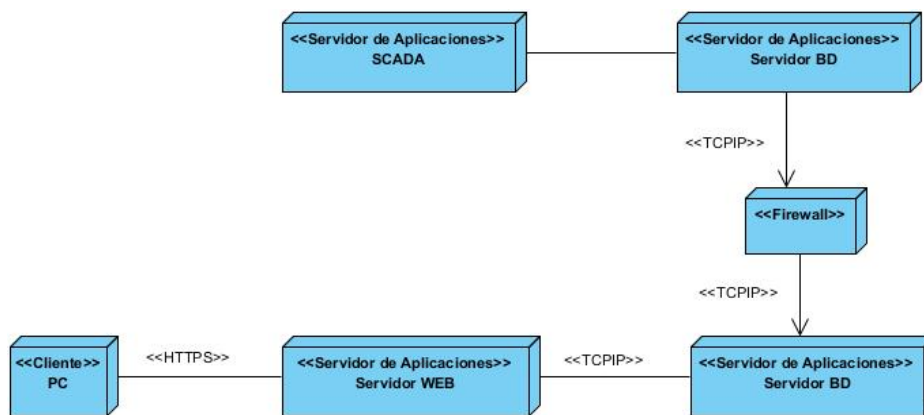


Figura 3. Diagrama del modelo de despliegue

Conclusiones

A partir de la realización del análisis y diseño de la propuesta de solución se obtuvo como resultado los diagramas y artefactos necesarios para guiar el desarrollo del mismo.

La implementación del sistema dio cumplimiento a los 15 requisitos funcionales agrupados en los 13 casos de uso, así como requisitos no funcionales orientados a la usabilidad, seguridad, fiabilidad y eficiencia del sistema identificados en las fases de análisis y diseño.

Como resultado se obtuvo el sistema de apoyo al arranque de turbina de vapor de 100MW en la central termoeléctrica Antonio Maceo Grajales, el cual permite reducir el tiempo de arranque hasta un máximo logrado de 23 minutos hasta la fecha, también permite que el operador se ajuste a la curva de arranque y no exceda el uso de portadores energéticos. Destacar que no se aplican métodos de inteligencia artificial para emitir consejos de operación en equipos fundamentales que puedan acelerar el proceso de arranque.

Conflictos de intereses

Los autores no poseen conflictos de intereses.



Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo **Atribución 4.0 Internacional** (CC BY 4.0)

Contribución de los autores

Conceptualización: Diosnel Quiñones Rosales, Luis Vazquez Seisdedos

Análisis formal: Diosnel Quiñones Rosales, Luis Vazquez Seisdedos

Investigación: Diosnel Quiñones Rosales, Luis Vazquez Seisdedos

Metodología: Diosnel Quiñones Rosales

Administración del proyecto: Diosnel Quiñones Rosales

Recursos: Diosnel Quiñones Rosales

Software: Diosnel Quiñones Rosales

Validación: Diosnel Quiñones Rosales

Visualización: Diosnel Quiñones Rosales

Redacción: Diosnel Quiñones Rosales, Luis Vazquez Seisdedos

Financiamiento

El trabajo no requirió financiación.

Referencias

- Rodríguez, J. L. Curvas de arranque de unidades de 100 MW: ISPJAE, Ingeniería mecánica, 2000, (2): p. 57-65.
- Villavicencio, A. Investigación y desarrollo tecnológico en la Gerencia de Supervisión de Procesos: Boletín IIE, 2002: p. 51-57.
- Quintero, A. Sistema de Ayuda para el arranque del generador de vapor de una unidad termoeléctrica: Boletín IIE, 2002: p. 81-88.
- Rodríguez, J. L. Problemas de operación durante el arranque de un bloque energético de 330 MW.: Matanzas, Universidad de Matanzas, 2010: p. 15.
- García, S. Cogeneración: diseño, operación y mantenimiento de plantas de cogeneración.: Ediciones Díaz de Santos, 2008, Vol. 1: p. 564.
- Villabrille, J. L. Montaje y puesta en marcha de centrales térmicas y ciclos combinados.: Ediciones Díaz de Santos, 2017, Vol. 1: p. 476.



Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo **Atribución 4.0 Internacional** (CC BY 4.0)

- Alobaid. Modeling and investigation start-up procedures of a combined cycle power plant.: Applied Energy, 2008, Vol. 85: p. 1173-1189.
- Shirakawa, M. Intelligent start-up schedule optimization system for a thermal power plant.: Kananaskis: s.n., IFAC Symposium on Power Plants and Power Systems Control., 2006.
- Lind, A. Start-up Optimization of a Combined Cycle Power Plant. s.l., Munich, Germany : Proceedings of the 9th International Modelica Conference, 3-5 de September de 2012.
- Dietl, K. Start up optimization of Combined Cycle Power Plants: Controller development and real plant test results., 2018, 599-604. 10.1109/CoDIT.2018.8394850.
- Tică, A. Optimization of the combined cycle power plant start-up. 54th ISA POWID Symposium, 2011. 487.
- Casella, F. Object-Oriented Modeling and Optimal Control: A Case Study in PowerPlant Start-Up. 2011: p. 9549-9554.
- Larsson, P. A framework for nonlinear model-predictive control using object-oriented modeling with a case study in power plant start-up. Proceedings of the IEEE International Symposium on Computer-Aided Control System Design. , 2013: p. 346-351.
- Casella, F. An Optimization Procedure of the Start-Up of Combined Cycle Power Plants. IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline), 18, 2011: p. 7043-7048.
- Dong-mei, J. Optimization of Start-up Scheduling and Life Assessment for a Steam Turbine. Energy.: 2018 : p. 160.
- Pressman, R. S. Ingeniería del Software, 2010 [En línea] [Consultado el: 12 de febrero de 2021]. Disponible en: <http://www.javier8a.com/itc/bd1/ld-Ingenieria.de.software.enfoque.practico.7ed.Pressman.PDF>
- Navarro Cadavid, Andrés, Fernández Martínez, Juan Daniel, Morales Vélez, Jonathan Revisión de metodologías ágiles para el desarrollo de software. *PROSPECTIVA*. 2013, 11(2), 30-39 [En línea] [fecha de Consultado el 12 de Febrero de 2021]. ISSN: 1692-8261. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=496250736004>

