

INDUSTRIA 4.0 APLICADA A UNIDAD DE PRODUCCIÓN DE GASES DEL AIRE

Lucchesi, Alejandro^{1,2}; Riolfo, Agustín¹; Martín, Juan Pablo³; López, Pedro Manuel³;
Campomar, Guillermo Daniel²

⁽¹⁾ Air Liquide Argentina S.A.

⁽²⁾ Grupo de Estudios de Sistemas de Control (G.E.Si.C), Facultad Regional San Nicolás, U.T.N.

⁽³⁾ Grupo de Investigación de Comunicaciones, Facultad Regional San Nicolás, U.T.N.

alejandro.lucchesi@airliquide.com ; agustin.riolfo@airliquide.com ; jpmartin@frsn.utn.edu.ar ;
plopez@frsn.utn.edu.ar ; gcampomar@frsn.utn.edu.ar

RESUMEN

Uno de los métodos más utilizados para la producción de gases del aire es mediante la destilación criogénica. Para simplificar la logística a los clientes, los productos se producen y transportan en estado líquido. En determinadas locaciones, debido a las fluctuaciones del mercado, las detenciones y puesta en marcha de las unidades de producción ocurren frecuentemente y requieren de un gran número de intervenciones del operador. Para minimizar la variabilidad de los tiempos de arranque, y mejorar la experiencia del operador en la interacción con la Planta, se implementaron herramientas innovadoras. Respecto de la interfaz hombre - máquina, se desarrollaron pantallas de operación de alta performance (High Performance Human Machine Interface). Para la puesta en marcha de la planta, se desarrolló una secuencia de arranque automático supervisado, donde el operador debe ir verificando las acciones que realiza el secuenciador. Con la ayuda de una herramienta de ajuste de controladores PID desarrollada en el Grupo de Estudios de Sistemas de Control (GESiC - FRSN), se mejoró el desempeño de los lazos realimentados. Se realizó una gestión de alarmas y el Grupo de Investigación de Comunicaciones (GICom - FRSN) desarrolló una herramienta de alerta al operador a su teléfono móvil. Ante un evento en Planta, el operador recibe un mensaje instantáneo con la descripción de la alarma de proceso. En el presente trabajo se describen las acciones mencionadas y los resultados obtenidos.

Palabras Claves: HMI de alta performance, arranque automático, gestión de alarmas.

ABSTRACT

One of the most used methods for the production of air gases is the cryogenic distillation. To simplify the logistics of delivering the products to customers, the gases are produced and distributed in liquid state. In some Production Units, due to market demand fluctuations, frequent Plant start and stop happens which requires several manual interventions of the operator. To minimize the variability of the startup required time, and to improve the operator experience in the interaction with the plant, innovative tools were implemented. High Performance Human Machine Interface displays were designed. For the Plant startup, a supervised automatic sequencer was developed, where the sequencer executes all the routine with the supervision of the operator. Using the PID controller tuning tool designed in the "Control systems research group" (GESiC – FRSN), the feedback loop controller performance was improved. An alarm management system was setup, and the "Communications research group" (GICom – FRSN) developed a tool to alert the operator in the mobile phone. In case of a Plant event, the operator receives an instant message with the process alarm description. In the present paper, the implementations and the results are described

Keywords: High Performance HMI, automatic startup, alarm management

1. INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se expone la implementación de herramientas vinculadas a la Industria 4.0 en una planta industrial de destilación de gases del aire.

Se estructura de la siguiente manera. En la sección 2.1, se presenta el desarrollo de pantallas de operación (Interfaz Hombre Máquina) de alta performance, para mejorar la conciencia de la situación de los operadores. La sección 2.2 detalla el procedimiento de puesta en marcha automática de la planta, con los pasos del secuenciador. En la sección 2.3, se explica el uso de un software de identificación y ajuste de lazos de control y se presenta una aplicación práctica. Luego, en la sección 2.4, se dan detalles de la herramienta de gestión de alarmas, junto con el sistema de notificación vía mensajería de telefonía móvil desarrollado. Finalmente, se describen las conclusiones.

2. DESARROLLO.

2.1. Interfaz Hombre - Máquina de alta performance.

En el trabajo de (Endsley, 1995) se define al término “conciencia de la situación”, como la percepción de los elementos en el entorno en un volumen de tiempo y espacio, la comprensión de su significado y la proyección de su estado en el futuro cercano. De manera informal e intuitiva, se define como “saber qué es lo que está sucediendo”. De la definición formal, se observan los 3 niveles que describen (Nazir, Colombo, & Manca, 2012), y que especifica para el caso particular de los operadores de sala de control:

- Nivel 1 - Percepción
- Nivel 2 - Comprensión
- Nivel 3 - Proyección

Enumera los factores que afectan la “conciencia de la situación”, dentro de los cuáles se encuentran:

- Naturaleza de los datos.
- Consistencia de los datos.
- Flujo de la información.
- Conocimiento del software.

La calidad de la interfaz hombre - máquina y del sistema de alertas tiene relación directa con estos factores. (Wickens, 2008) hace referencia a la relación entre el grado de automatización y la carga de trabajo y la importancia del buen diseño del HMI para mantener un alto grado de “conciencia de la situación”.

Se diseñaron pantallas de operación utilizando el concepto de “Interfaz Hombre - Máquina de alta performance”. Se desarrollaron indicadores del tipo “barra”, donde el operador puede identificar rápida y visualmente si la variable se encuentra dentro del entorno normal de operación, la distancia a los umbrales de alarma o detención del proceso y el estado de alarma con su prioridad. Se definen 3 estados de prioridad en función de una matriz de severidad / tiempo disponible de actuación por parte del operador, y se indican mediante colores en las pantallas de operación:

- Baja Prioridad (L) – Amarillo
- Media Prioridad (M) – Naranja
- Alta Prioridad (H) – Rojo.

En la Figura 1 se pueden apreciar 2 ejemplos, en los cuáles en uno de ellos se encuentra en estado de alarma de baja prioridad por estar la temperatura por encima del umbral.

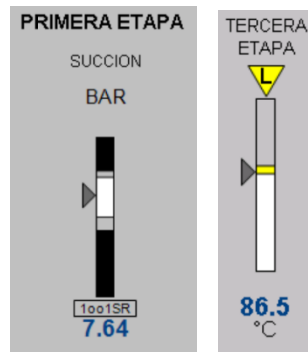


Figura 1a Ejemplo de indicador tipo barra con umbrales de alarma y disparo. Figura 1b Ejemplo de variable en estado de alarma de baja prioridad.

Para los controladores PID, se desarrollaron plantillas donde el operador puede identificar la variable de proceso, la referencia (Setpoint) y la salida del controlador. A su vez, se incluyen gráficos de tendencia, que brindan mayor información sobre la evolución de las variables en el tiempo (Figura 2).

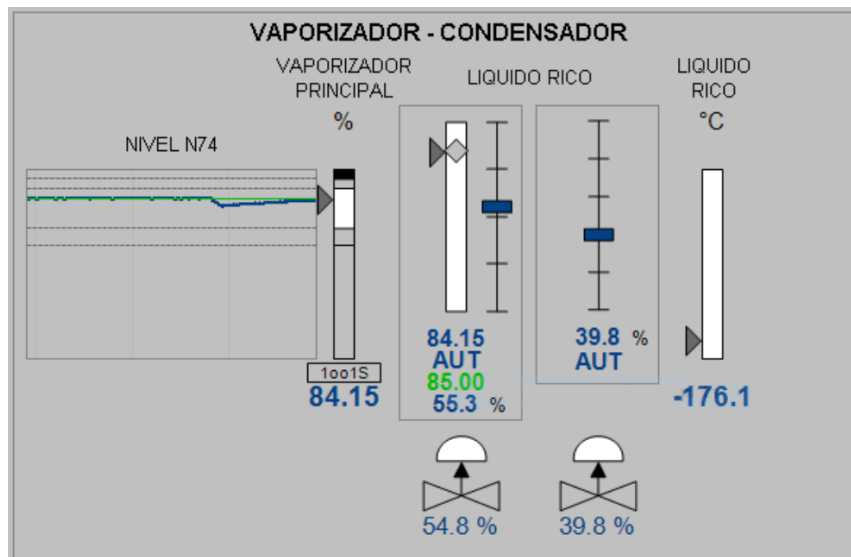


Figura 2 Ejemplo de Controlador PID con gráfico de tendencia.

2.2. Secuencia de Arranque Automático Supervisado.

Debido a las fluctuaciones del mercado, la planta separadora de gases del aire y el liquefactor de nitrógeno requieren de frecuentes puestas en marcha. El mayor número de maniobras a ejecutar por parte del operador es durante el proceso de arranque de estos equipos. Gran parte de las mediciones de las variables físicas de la planta y los elementos finales de control se encuentran automatizados en el Controlador Lógico Programable. Es decir, las intervenciones que debe realizar el operador para la puesta en marcha son a través de la Interfaz Hombre Máquina (HMI), con mínimas operaciones manuales en campo.

En el trabajo de (Watson & Scheidt, 2005), se define a un Sistema capaz de cambiar su comportamiento en respuesta a eventos no anticipados en la operación como Sistema Autónomo. Se describen además los avances en las áreas de vehículos no tripulados, ya sea marítimos, terrestres, aéreos y espaciales.

(Gamer, Hoernicke, Klöpfer, Bauer, & Isaksson, 2020) hacen referencia a la popularidad que ganó el término “autónomo” debido a los automóviles sin conductor. Describen una taxonomía existente de 6 niveles, de manera de poder clasificar la capacidad de conducción autónoma de un vehículo. En ese mismo trabajo, indican que los sistemas convencionales de automatización de plantas industriales permiten que los procesos de bajo nivel funcionen sin intervención humana en condiciones normales y en un contexto limitado. Y que para las tareas complejas se requiere de la toma de decisión e

intervención humana. Para realizar los sistemas de automatización más autónomos se requiere que progresivamente esas tareas se vayan migrando al sistema. Proponen una taxonomía de clasificación para plantas autónomas de 6 niveles (de 0 a 5), donde definen las principales características para los operadores de sala de control, el personal de operación y mantenimiento de campo y los planificadores de producción. Para el presente trabajo, se define un objetivo de alcanzar un nivel 3 en esta clasificación, donde se consideran los siguientes requerimientos:

Nivel 3: Detención de la Planta, puesta en marcha y transiciones automáticas, a solicitud del personal. Corrección automática de desvíos conocidos. Soporte a las decisiones para fallas inesperadas o desconocidas. Los requerimientos de operaciones manuales en campo son fuertemente reducidas.

Si bien la ejecución de la puesta en marcha la realizará el secuenciador, es necesario que el operador supervise la evolución del arranque, y tome acción en caso de una situación inesperada. Debido a que la secuencia requiere de la operación de una cantidad mínima de válvulas manuales, en determinados pasos se requiere de la confirmación del operador de que el elemento fue accionado manualmente en campo.

Se definen los siguientes pasos para la puesta en marcha automática:

1. Sistema de refrigeración: bomba de agua y ventilador de torre de enfriamiento.
2. Sistema de lubricación Compresor de aire: bomba de aceite, extractor de vahos y habilitación de calentador de aceite.
3. Habilitación equipo frigorífico.
4. Preparación de lazos de control de Compresor de aire y Columna de destilación en condición de puesta en marcha de Planta.
5. Arranque Compresor de aire.
6. Carga de Compresor de aire.
7. Habilitación de botellas de depuración de aire en modo Automático.
8. Alimentación de columna de destilación con aire purificado.
9. Habilitación de lazos de control de columna de destilación y venteo de producto fuera de especificación a atmósfera.
10. Sistema de lubricación Liquefactor: bomba de aceite, extractor de vahos y habilitación de calentador de aceite.
11. Preparación de lazos de control de Compresor de reciclo y Liquefactor en condición de puesta en marcha de Liquefactor.
12. Arranque Compresor de Ciclo.
13. Carga de Compresor de Ciclo.
14. Arranque de Turbinas criogénicas.
15. Carga de Turbinas criogénicas en rampa, monitoreando condiciones.
16. Habilitación de producción de nitrógeno líquido a tanque.

En cada uno de los pasos, existen condiciones que son monitoreadas por el sistema para avanzar al paso siguiente. Por ejemplo, que la temperatura de aceite haya superado el valor mínimo para arrancar, o la confirmación de apertura o cierre de determinadas válvulas.

El operador tiene la posibilidad de configurar gran parte de los parámetros del secuenciador: pendiente de la rampa de carga de los equipos y controladores, selección de equipos donde existe redundancia, tiempos de espera entre pasos y umbrales de condiciones de avance de paso.

En la Figura 3, se puede observar una pantalla del HMI para el caso donde se están cargando gradualmente las turbinas del liquefactor.

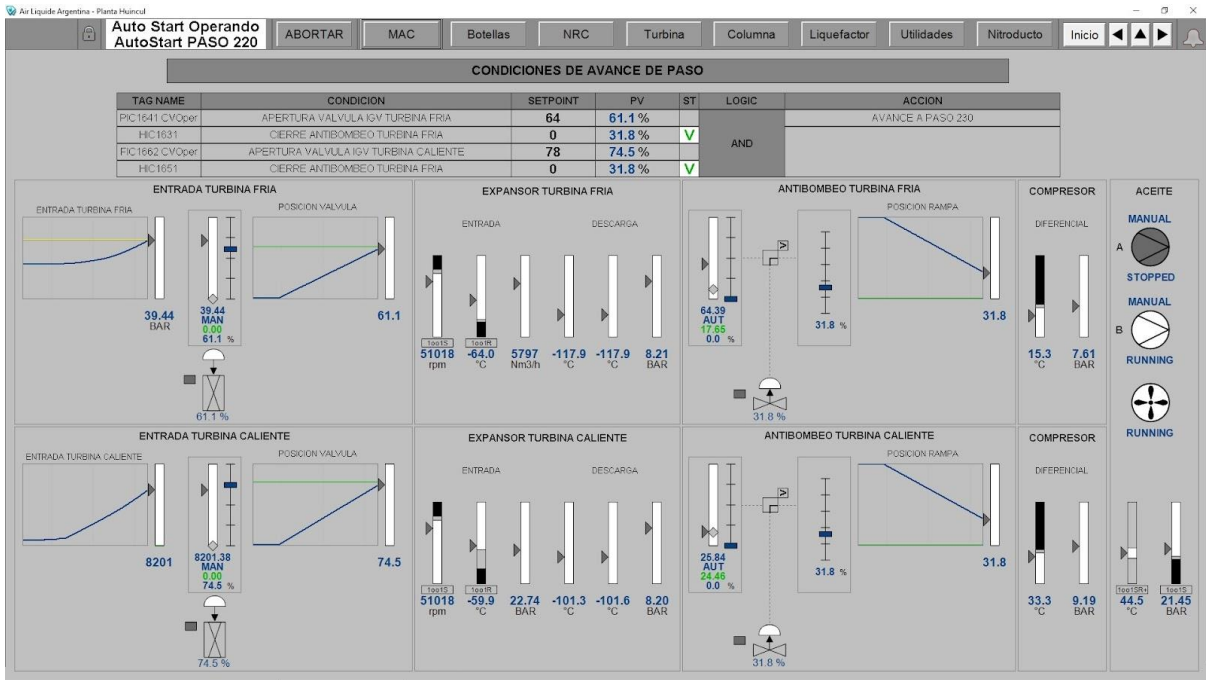


Figura 3 Ejemplo de Pantalla de secuenciador de puesta en marcha automática.

2.3. Ajuste de lazo de Controlador PID (Proporcional – Integral – Derivativo).

Un estudio realizado por (Desborough & Miller, 2002), donde estudiaron más de once mil controladores en la industria de refinación, química y papel, encontraron que más del 97% de los controladores realimentados utilizados usan el algoritmo PID. Luego de estudiar el desempeño de más de veintiséis mil controladores, concluyeron que solo un tercio de ellos tienen una respuesta clasificada como “satisfactoria”, mientras que el resto se encontraba con problemas de oscilación, en modo “manual” (es decir, a lazo abierto) o bien con una respuesta poco satisfactoria. Se verifica la necesidad e importancia del ajuste adecuado de los controladores.

El Grupo de Estudios de Sistemas de Control (GESiC) de la FRSN - UTN, desarrollo un Software de Identificación y Ajuste de Controladores PID (Lucchesi, Campomar, Herrera, & Zanini, 2017) que fue utilizado para el ajuste lazos en esta Planta. Por ejemplo, el nivel de líquido rico en oxígeno de la columna de media presión se controla mediante la velocidad de una turbina criogénica. El lazo de control de velocidad actúa sobre una válvula en la aspiración de la misma. Es decir, utiliza una estrategia de control de 2 lazos en Cascada.

Se realiza un ensayo de escalón de velocidad de la turbina (Figura 4a), y luego mediante la herramienta de identificación se obtiene una función de transferencia de Integrador con retardo (Ecuación 1). Con la función de simulación se obtiene un ajuste de Controlador PID que cumple con los requisitos de diseño (Figura 4b). Luego se realiza un escalón de Setpoint de nivel en el Controlador de la Planta con los nuevos parámetros de ajuste para verificar el correcto funcionamiento (Figura 5). Las variaciones que se observan se deben a un disturbio que ocurre por una purga automática.

$$G(s) = \frac{2,93 \times 10^{-6}}{s} e^{-102.s} \quad (1)$$

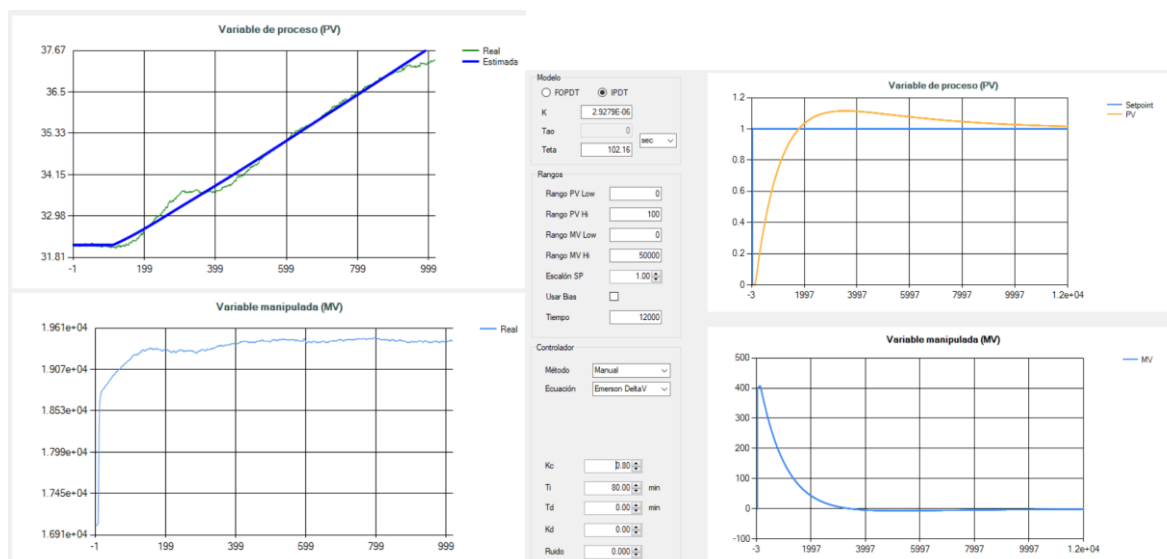


Figura 4a Identificación de dinámica del lazo de nivel. Figura 4b Simulación diseño Controlador PID.

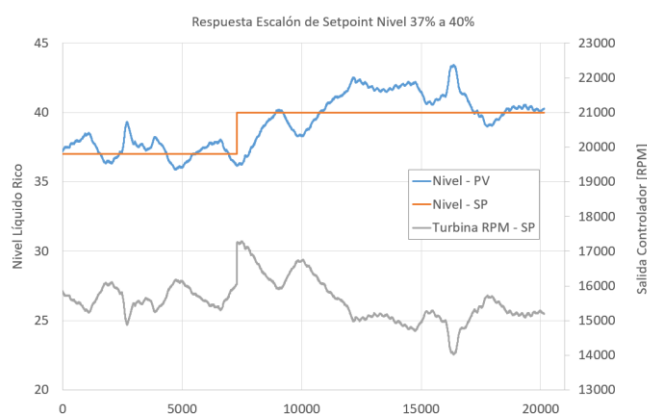


Figura 5 Respuesta a lazo cerrado del controlador de nivel ante escalón de SP de 37% a 40%.

2.4. Gestión y notificación de alarmas.

El sistema de alarmas de la planta cumple la función de notificar al operador cuando los parámetros del proceso comienzan a desviarse de los valores aceptables, o bien, cuando algún equipo está en falla. Un buen sistema de alarmas debe asistir al operador a resolver estos desvíos antes de llegar a valores en los que actúe el sistema de parada de emergencia automática de planta (EEMUA, 2015).

Un problema muy habitual es que el sistema de control suele estar sobrecargado de alarmas. Esto hace imposible que el operador pueda atenderlas en tiempo y forma para corregir las anomalías del proceso. En el trabajo de (Vernon, Reising, Downs, & Bayn, 2004), basándose en estudios de performance de operadores, se establece que el tiempo que necesita un operador para responder a una alarma y tomar acciones correctivas es de aproximadamente 49 segundos. A una conclusión similar y más detallada llega (EEMUA, 2015) donde se establece que con más de 10 alarmas por minuto es muy probable que el sistema no sea viable para los operadores; con una cada 2 minutos hay altas probabilidades de que sea muy demandante; con una cada 5 minutos es manejable y menos de una cada 10 minutos es muy probable que sea aceptable.

Para asegurar que el sistema de alarmas sea útil y cumpla su función, es necesario realizar una gestión de alarmas, entendiendo este término como una conjunción de procesos que aseguran la efectividad de un sistema de alarmas. Una mala gestión de las alarmas puede llevar no solo a tener paradas de planta, que redundan en impactos económicos y en la confiabilidad, sino que también puede generar situaciones potencialmente peligrosas y hasta letales. En el trabajo de (Briwa, Leva, & Turner, 2022) se recopilan varios casos en los que la mala gestión de alarmas fue una de las causas raíz de distintos accidentes graves en plantas industriales.

La norma (ANSI/ISA-18.2, 2016) propone una filosofía para que la gestión de alarmas sea exitosa. En un primer paso se lleva a cabo la identificación, racionalización, diseño detallado y la implementación del sistema de alarmas. En el segundo paso se realiza un monitoreo del sistema implementado, para chequear que cumpla con lo establecido y no sobrecargue con alarmas a los operadores de planta. Si se determina que el sistema no se comporta como lo esperado, se vuelve al primer paso para realizar correcciones, cerrando así el lazo de mejora continua.

Para la ejecución del primer paso, la norma (EEMUA, 2015) establece que la alarma debe ser importante, única, temporalmente adecuada, priorizada, entendible y explicativa.

Para la ejecución del segundo paso, se puede hacer uso del método de tratamiento de malos actores, que permite seleccionar las principales alarmas que requieren correcciones para llevar el sistema a la estabilidad. Los malos actores son las alarmas que suenan con más frecuencia en la planta. La literatura sugiere que las alarmas de planta siguen el principio de Pareto, es decir, que el 20% de las alarmas más frecuentes representan el 80% de las alarmas que suenan en planta. Por lo tanto, resolviendo el problema con estos malos actores se pueden obtener mejoras significativas (Hollifield B, Habibi E, 2010).

Dentro de estos malos actores, hay varias categorías de alarmas típicas:

Alarmas en parloteo: Son alarmas que frecuentemente se activan y se mantienen en alto por un corto período de tiempo.

Alarmas molestas: Son todas las alarmas que se activan excesivamente de manera innecesaria.

Alarmas repetitivas: Son alarmas que se repiten siempre en el mismo período de tiempo.

Una gran cantidad de los malos actores pueden corregirse con acciones relativamente simples, como dar una mayor precisión en los umbrales de alarma y la implementación de retardos de tiempo y bandas muertas (Zhu, Shu, Zhao, & Yang, 2014).

Tomando los principios antes mencionados como premisa, se desarrolló el proyecto de gestión de alarmas de la Planta con su liquefactor asociado. Para la primera etapa se realizó una categorización en tres niveles de prioridad, basada en la urgencia de corrección y consecuencias potenciales que cada alarma podría traer en el proceso.

Para la segunda etapa, haciendo uso del registro de alarmas de planta, se recopilaron las alarmas de un periodo de dos meses y se realizó un diagrama de Pareto para detectar los malos actores. A partir de esta identificación se realizaron reuniones de seguimiento para debatir acciones correctivas que luego fueron debidamente implementadas.

Se realizaron dos iteraciones de este proceso, observando el efecto de reducción de alarmas de las acciones tomadas y sugiriendo e implementando nuevas acciones correctivas que redujeron aún más la cantidad de alarmas respecto de los meses anteriores (Tabla 1).

Tabla 1 Indicadores claves de desempeño de la gestión de alarmas.

		Análisis de Mejora con la implementación del plan de acción			
		Sistema Inicial (Enero - Marzo)	Sistema Mejorado (Junio - Julio)	Sistema Final (Septiembre - Octubre)	Porcentaje de disminución de las alarmas después del tratamiento
General	Promedio de alarmas / día	38.7	31.5	15.1	61.08%
	Inundaciones promedio / día	0.6	0.6	0.2	71.98%
Inundaciones de alarmas	Promedio de alarmas / inundación	46.5	14.9	24.8	46.63%
	# máximo de alarmas / inundación	734	59	44	94.01%
Parloteo de alarmas	Alarmas involucradas en el parloteo de alarmas	35	11	20	42.86%
	Promedio de instancias / semana	10.6	3.3	8.5	19.51%

2.4.1. Ejemplo de resolución de mal actor en medición de caudal

Durante el mes de marzo un caudalímetro de planta tuvo 1049 alarmas por alto caudal, representando el 21,88% del total. Tras un análisis de los históricos de planta (Figura 6) se determinó que el umbral de alarma, fijado en 500Nm³/h, era muy bajo para los valores normales de operación. Además, la señal no tenía programada una banda muerta ni un retardo de tiempo, lo que provocaba muchas reentradas del mismo evento de alarma por la naturaleza ruidosa de las mediciones de caudal, generando inundaciones.

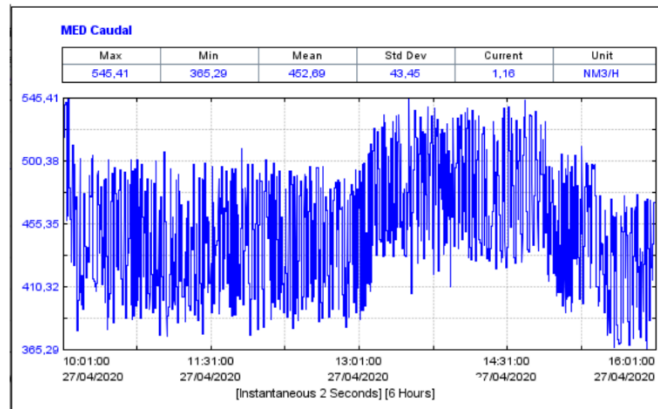


Figura 6 Gráfico de tendencia de la medición de caudal.

Las acciones correctivas fueron ajustar el umbral de la alarma de alto caudal e implementar una banda muerta de 100Nm³/h y un retardo de tiempo de 10 segundos para el disparo de la misma. Como consecuencia, en el plazo junio - julio, la alarma sonó solo 15 veces, representando el 0,45% de las alarmas de la planta.

2.4.2. Ejemplo de resolución de mal actor en medición de temperatura

La temperatura de aceite de una turbina generaba alarmas repetitivas una vez por día con su máquina asociada parada, esto debido al cambio de temperatura ambiente entre el día y la noche. De esta forma hubo 51 ocurrencias de la alarma en el plazo enero - marzo, representando el 1,06% del total.

Para esta alarma, era necesario que la misma reportara baja temperatura con máquina parada, pero a diferente umbral de disparo del establecido para la máquina en marcha. Por esto, la acción correctiva fue establecer un doble umbral de alarma, uno para máquina en marcha y otro para máquina parada. Esto redujo la cantidad de alarmas a solo 3 ocurrencias en el plazo junio - julio, representando el 0,09% del total de alarmas.

2.4.3 Notificación de alarmas via mensajería a telefonía móvil.

Se definió un mecanismo de envío de notificaciones para ciertos eventos generados por las plantas. El objetivo era que los operadores de la planta estén informados ante desvíos importantes y en base a esa información tomen una decisión de desplazarse hasta la planta o no.

Debido a consideraciones de seguridad, no se permitió una conexión directa al sistema de supervisión y control de la planta. En su lugar, se implementó un acceso en modo de solo lectura a un archivo de registros de eventos generado por el sistema de supervisión de la planta. Este archivo registra eventos relevantes relacionados con las variables de procesos. Un software ad-hoc monitorea continuamente estos archivos y, cuando se agrega una nueva línea, extrae los datos y los envía de manera segura a través del correo electrónico en un formato estandarizado.

En la nube, un sistema dedicado recibe los mensajes enviados por la planta, interpreta su contenido y aplica reglas de negocio predefinidas para determinar si un evento requiere notificación a los operadores. Solo los mensajes que contienen información relevante pasan el filtro. Estos mensajes se formatean y encolan para su posterior envío a los operadores.

Los mensajes que fueron encolados por el proceso anterior, se envían mediante una conexión a Telegram. Esta conexión permite enviar un mensaje tanto a personas específicas como a grupos de

operadores. Dependiendo de la planta a la que corresponda, el sistema determina a que grupo debe enviar el mensaje.

Luego el administrador del grupo puede agregar o quitar personas según las definiciones de la compañía. Además, los operadores pueden configurar el tipo y modo de alerta que el teléfono les dará en cada uno de los grupos.

De esta manera, la compañía tiene el control total y puede hacer cumplir sus políticas de seguridad en cuanto a quién se notifica y luego los usuarios también pueden personalizar las notificaciones. En la Figura 7 se muestra un ejemplo de una pantalla de la aplicación de mensajería.

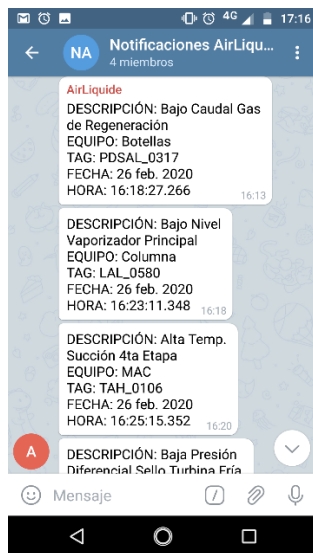


Figura 7 Pantalla de teléfono móvil con aplicación Telegram.

3. CONCLUSIONES.

La herramienta de puesta en marcha autónoma de la Planta permitió reducir el tiempo de arranque en aproximadamente 20%, y con un procedimiento estándar.

Mediante el HMI de alta performance y la gestión correcta de las alarmas, los operadores poseen una interpretación más adecuada del proceso y del estado de las variables que intervienen en la operación de la Planta. Al contar con un sistema de notificación al teléfono móvil, el operador no requiere estar en la Sala de Control permanentemente, liberándolo para realizar otras tareas en campo.

Se obtuvieron resultados positivos en la vinculación Universidad – Empresa, mediante el trabajo conjunto se consiguieron sortear algunos de los desafíos tecnológicos que se plantearon durante la ejecución del proyecto.

4. REFERENCIAS.

ANSI/ISA-18.2. (2016). *Management of Alarm Systems for the Process Industries*.

Briwa, H., Leva, M., & Turner, R. (2022). Alarm Management for Human Performance. Are We Getting Better? *Proceedings of the 32nd European Safety and Reliability Conference (ESREL)*.

Desborough, L., & Miller, R. (2002). Increasing customer value of industrial control performance monitoring-Honeywell's experience. *AIChE symposium series*, 169-189.

EEMUA. (2015). *Publication 191 - Alarm systems - a guide to design, management and procurement*. London.

Endsley, M. (1995). Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 32 - 64.

- Gamer, T., Hoernicke, M., Klöpfer, B., Bauer, R., & Isaksson, A. (2020). The autonomous industrial plant – future of process engineering, operations and maintenance. *Journal of Process Control*.
- Lucchesi, A., Campomar, G., Herrera, H., & Zanini, A. (2017). Tuning Software Based on Genetic Algorithm Applied to Industrial PID Loops. *International Conference on Control, Artificial Intelligence, Robotics & Optimization (ICCAIRO)*.
- Nazir, S., Colombo, S., & Manca, D. (2012). The Role of Situation Awareness for the Operators of Process Industry. *Chemical Engineering Transactions*.
- Vernon, D., Reising, D., Downs, J., & Bayn, D. (2004). Human Performance Models for Response to Alarm Notifications in the Process Industries: An Industrial Case Study. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*.
- Watson, D., & Scheidt, D. (2005). Autonomous systems. *Johns Hopkins APL Technical Digest (Applied Physics Laboratory)*.
- Wickens, C. (2008). Situation Awareness: Review of Mica Endsley's 1995 Articles on Situation Awareness Theory and Measurement. *Human factors*.
- Zhu, J., Shu, Y., Zhao, J., & Yang, F. (2014). A dynamic alarm management strategy for chemical process transitions. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*.