

Integración Longitudinal STEM, aprendizaje reflexivo y conceptos alternos en Termodinámica para Ingeniería Metalúrgica.

PhD. Hector Henao, Universidad Técnica Federico Santa María, hector.henao@usm.cl

Ps. David Jofré, Universidad Técnica Federico Santa María, david.jofre@usm.cl

Resumen.

Se describen los procesos de innovación educativa en ingeniería efectuada en la asignatura de “Termodinámica Metalúrgica” del plan de estudios de la carrera de “Ingeniería Civil Metalúrgica y de Materiales” en la USM. La iniciativa de innovación se basó en el enfoque metodológico de “aprendizaje reflexivo” y “aprendizaje basado en preguntas”. Para la implementación del modelo, se optó por la vía de conceptualizar la termodinámica desde una formulación axiomática, en contraste con la forma tradicional que trata los principios termodinámicos como leyes. Lo que busca llegar de una forma lógica y secuencial al concepto de la energía libre de Gibbs y sus aplicaciones en la metalurgia. El documento describe el porqué de la aplicación de estos enfoques, la dinámica de las sesiones y el método de evaluación del curso. Para el análisis de datos y hallazgos principales se efectuó una evaluación triangular de los resultados del curso usando entrevistas en profundidad, resultados de exámenes de evaluación y encuestas de satisfacción del desempeño docente. El análisis de datos arroja una alta efectividad de esta metodología empleada para la generación de aprendizajes significativos en los estudiantes participantes, asumida en un grupo pequeño de alumnos (n=6).

Introducción.

La problemática base de los cursos de termodinámica. Una experiencia de 10 años en enseñanza de termodinámica para programas de ingeniería, llevó a concluir para el autor principal de este documento, el que las mayores dificultades para el aprendizaje son la naturaleza abstracta de los conceptos, la falta de priorización y por tanto, el diseño de cursos sobrecargados de información, y finalmente - el uso de pedagogías centradas en el profesor. Todo lo cual observado, conduce a una pérdida de la motivación del estudiante por la asignatura (motivación como componente “core” de las actitudes proclives al aprendizaje), junto a un alto número de estudiantes pidiendo promover contenidos procedentes a un entendimiento conceptual y no solo memorización.

En base a esta experiencia vivenciada y recogida, se condujo a la búsqueda de metodologías aptas para responder a las expectativas de los estudiantes y, al mismo tiempo, metodologías que se ajustaran al modelo educativo institucional de la USM, el cual declara a “los profesores como moderadores del proceso de enseñanza-aprendizaje que genere las condiciones para un desarrollo integral de los estudiantes. Para desarrollar este modelo educativo, las metodologías lectivas deben seleccionarse de tal forma que desarrollen una actitud creativa en las y los estudiantes, su capacidad de descubrimiento y las competencias asociadas a la reflexión continúa. El modelo explícito institucionalmente por la USM se basa en un enfoque constructivista mediado por procesos activos en la construcción del conocimiento desde y con el estudiante” [1].

Dado que el modelo educativo establece “promover el desarrollo de investigación en docencia por medio de transformar el aula en un objeto de investigación que permite comprender cómo el estudiante aprende de manera más efectiva y por tanto establecer, por

medio de evidencia empírica, cómo mejorar las experiencias de enseñanza – aprendizaje [1], los autores del presente documento decidieron compartir la experiencia del diseño e implementación de un curso de termodinámica, dejando además evidencia empírica sobre su efectividad.

Para el diseño del curso y a través de una extensa revisión bibliográfica, se cotejó el método tradicional con el cual se había enseñado la asignatura con los métodos más acordes con el modelo de enseñanza declarado por la USM. Un resumen de este análisis está incluido en la Tabla 1 con las respectivas referencias que soportan la efectividad de los métodos a innovar.

Tabla 1: Modificaciones efectuadas en el método de enseñanza (el número de referencia indica la literatura que soporta el método de enseñanza seleccionado).

Método anterior	Método actual
Enseñanza donde no se cuestionan las razones por las cuales hay dificultades para aprender la termodinámica.	Enseñanza basada en el hecho de la existencia de “conceptos alternativos” y como aprovecharlos para avanzar en el conocimiento. [2, 3, 4, 5, 6]
Esfuerzo en: Que enseñar y que libro usar.	Esfuerzo en: Como enseñar Enfocado a enseñar para ayudar a los estudiantes a aprender.[7, 8, 9, 10, 11]
Cursos basados en presentaciones para entregar información (Transmisión de información).	Curso basado en técnicas de aprendizaje y enseñanza activos Promover el pensamiento en términos de conceptos Enfasis en modificar conceptos alternativos [7, 2, 3, 4, 5, 6]
Enseñanza basada en presentaciones	Enseñanza basada en cuestionamientos [9]
Enseñanza basada en estrategias para resolver problemas	Enseñanza basada en fundamentos conceptuales[7, 2, 3, 4, 5, 6,]
Material a estudiar despues de clase	Preparación y estudio del material antes de la clase [9]
Amplia cobertura de temas-baja comprensión	Menos cubrimiento de temas-alta comprensión de los temas Presentación breve de los tópicos [9]
Enseñanza basada en definiciones y las leyes de la termodinámica	Enseñanza basada en axiomas y un tratamiento matemático rigurosos de los conceptos de: Energía Calor Entropía Entalpía Equilibrio Temperatura Potencial químico Presión [12, 13, 14, 15, 16, 17, 18]

Cada fila de la tabla 1 esta además relacionada directamente a facilitar la implementación de cada uno de los aspectos y/o proyectos de la USM) descritos a continuación:

Bajada del modelo USM a la experiencia en aula. Las metodologías de aprendizaje activo y colaborativo que promueve y propugna el Modelo Educativo Institucional USM tienen expresión diversa en las diferentes prácticas docentes en la universidad. Algunas de esas experiencias incluyen el enriquecimiento de los procesos lectivos a través del uso de TIC's, la clase invertida, la resolución de problemas ricos en contexto mediante el trabajo colaborativo de los estudiantes en sesiones tipo taller e incluso, además de laboratorios y otros, la utilización de Salas ACE (Scale-up) de layout circular y apoyo multitecnológico, como ha sido el caso de las sesiones efectuadas en esta asignatura.

Aprendizaje reflexivo (Enquiry based Learning). Desde los enfoques constructivistas de los procesos de enseñanza-aprendizaje, se asumen roles cada vez más horizontales en el rol docente, más como facilitador o mediador que como especialista portador del "saber" que transfiere verticalmente. El "aprendizaje socrático" es uno de los antecedentes de los escenarios y actividades de aprendizaje que promueven el aprendizaje reflexivo, el pensamiento crítico y el trabajo colaborativo de interacción circular. El aprendizaje reflexivo promueve un ambiente de aprendizaje activo centrado en el alumno para un aprendizaje profundo o significativo, donde se mediatiza un proceso de consulta y análisis crítico a la base del aprendiz. El aprendizaje reflexivo o enseñanza reflexiva se da en un escenario de aprendizaje circunscrito por un problema de aplicación auténtico y contextualizado donde los estudiantes son motivados a identificar sus propias claves y generar preguntas, en donde el maestro sirve como guía en el proceso de aprendizaje. Se fomenta un modelo de aprendizaje autoregulado debido a que la responsabilidad es de los estudiantes para determinar las cuestiones y preguntas de investigación y los recursos que necesitan para hacer frente a ellas.

"STEM Project USM – integración longitudinal" – Mecesus FSM1408. Este proyecto busca enfrentar estos desafíos realizando su aporte desde el aula, a través de una estrategia que genere iniciativas curriculares con componentes multidisciplinares de integración de contenidos en STEM a lo largo de los distintos ciclos de formación del estudiante. El objetivo es mejorar la experiencia de aprendizaje en los estudiantes y promover el desarrollo temprano de competencias profesionales del ingeniero y arquitecto UTFSM coherentes con las exigencias actuales. Estas iniciativas se constituirán en experimentos reales que, una vez evaluados, puedan escalarse y replicarse en la institución y eventualmente en otras instituciones del sistema.

La docencia como una actividad que va más allá de lo que sucede en el aula. Este proyecto plantea adicionalmente realizar acciones de apoyo a las comunidades que implementarán el proyecto a través de actividades de desarrollo profesional (capacitación), acceso expedito a recursos tecnológicos con asesoría para su correcta utilización y ampliación de la infraestructura necesaria para implementar las metodologías docentes activas. La intencionalidad final de este proyecto es producir en la comunidad UTFSM un cambio en la cultura institucional, en el que el trabajo multidisciplinario sea la forma de resolver los problemas y generar nuevas soluciones educativas para el país.

Como se desprende de la fila de la tabla 1 de la enseñanza basada en cuestionamientos, la importancia de la Diada profesor facilitador – profesor problematizador en el aprendizaje activo, la enseñanza reflexiva y el aprendizaje colaborativo basado en preguntas asume un dipolo en el que en un continuum el docente despliega por momentos un rol de mediación educativa y facilitación, pero en otros importantes espacios de la interacción circular de

cada sesión, problematiza la conceptualización temática para bajo una intención educativa manifiesta, generar un conflicto cognitivo que permite remover pre-conceptos y generar aprendizajes significativos. Esto se planificó y puso en juego en las sesiones de la asignatura, a través de la “utilización metafórica” de conceptos alternos acerca de principios o “conceptos umbrales” en termodinámica para la ingeniería aplicada.

Junto a lo anterior, complementado por un enfoque de Aprendizaje circular, el profesor como facilitador acompaña al grupo curso y sus participantes a través de la potenciación con una técnica de pensamiento visual que mediatiza un modo de aprendizaje colaborativo circular (CIRCEP). Lo que puede utilizarse a la vez como una estrategia meta-cognitiva, favoreciendo de paso el aprendizaje significativo y la representación de conocimientos en los alumnos y alumnas (Modelo de Kolb y Categorías de Honey y Mumford). Lo que implica obtener, procesar y representar información de manera sencilla como indica la Fig. 1. Es así que, muchas ideas o conceptos se expresan, comprendiéndose mejor si son representados a través de: mapas conceptuales, UVE, CIRCEP, diagramas, esquemas y otros. Esta técnica pretende lograr una percepción global de un hecho, concepto u objeto determinado.

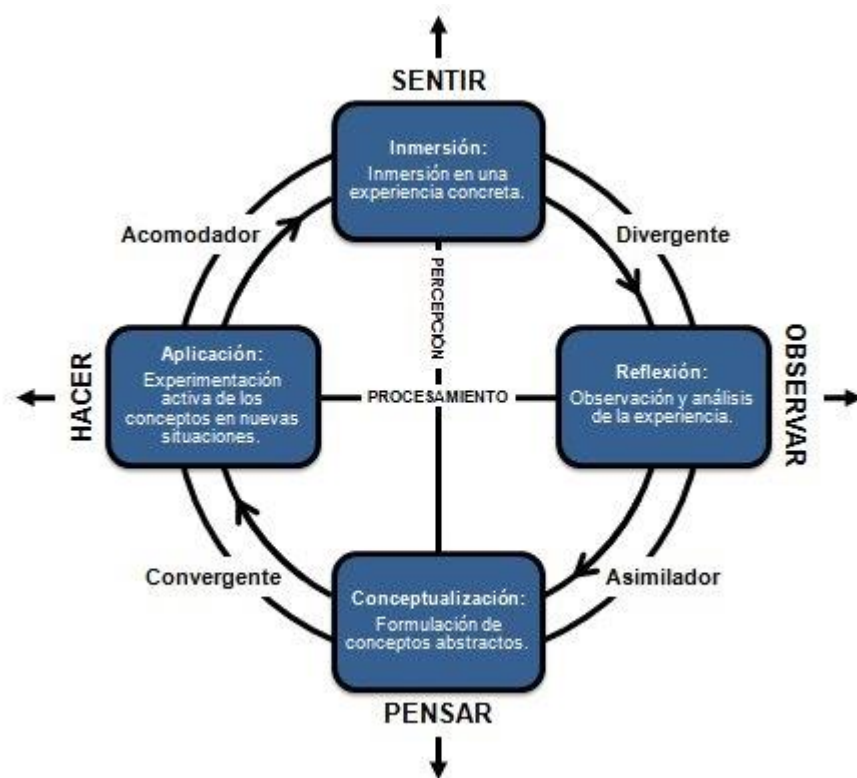
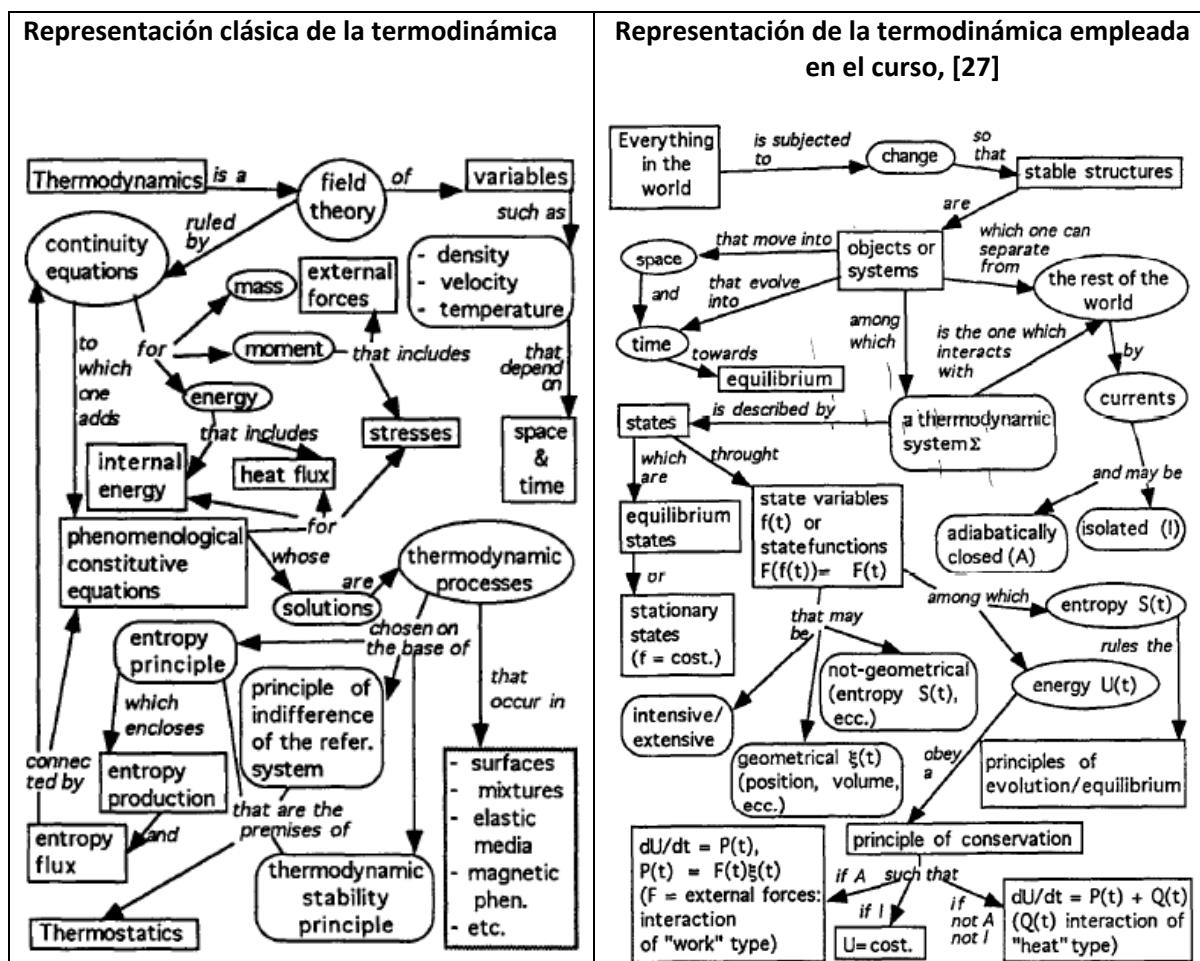


Fig. 1. Modelo de Kolb [19].

Selección de un método específico de enseñanza para la “Termodinámica Metalúrgica”.

Una vez definido el método general con el profesor como un problematizador y la dinámica del curso basada en cuestionamientos, se efectuó una detallada investigación en la literatura acerca de las diferentes alternativas existentes para la enseñanza de la termodinámica en particular. Algunos de los métodos alternativos reportados incluyen el uso extensivo de la matemática [20], metodologías basadas en la solución de problemas [21], enseñanza basada en proyectos prácticos propuestos [22] y cursos basados en simulación

dinámica [23, 24], técnicas de generación de analogías por parte del estudiante [25], dramatizaciones [26]. Después de un análisis de las diferentes alternativas, finalmente se



seleccionó el método axiomático desarrollado por Callen [27] incluido en la tabla 2. La selección de esta representación mental de la termodinámica en axiomas tiene la ventaja de desarrollar los conceptos desde una perspectiva diferente al método tradicional lo que permite revisar los conceptos desde una nueva perspectiva.

Tabla 2. Dos alternativas de estructura para un curso de termodinámica

Para ilustrar las diferentes posibles perspectivas, la tabla 2 incluye un diagrama con el método clásico y el método a empleado en el curso. Como se puede analizar, el método de la columna derecha (el método axiomática de Callen) conduce fácilmente a la formulación y desarrollo secuencial de las preguntas indicadas en la tabla 1 y cada cuestionamiento estaría relacionado a la deducción de una ecuación específica. El método axiomático tiene la ventaja adicional de permitir el desarrollo de la termodinámica como una construcción matemática fácil de seguir usando conceptos simples del cálculo diferencial en integral. Además, permite una descripción precisa de conceptos como temperatura, presión, y actividad química para citar algunos ejemplos. La representación termodinámica empleada por el curso, permite una conceptualización matemática donde los conceptos de temperatura, presión, actividad química tienen una descripción precisa. Esta conceptualización lógica contribuye a modificar conceptos alternativos. El método tradicional

al discutir nuevamente la termodinámica desde la misma perspectiva, podría requerir un mayor esfuerzo para lograr el mismo efecto.

Desarrollo del curso.

El curso tenía una intensidad horaria de tres (4.5) horas por semana en dos (3) sesiones. Cada sesión iniciaba con una pregunta de cómo definir un concepto termodinámico (por ejemplo: ¿qué es energía?). Una de las sesiones (1.5 horas) correspondía a un ayudantía. En cada sesión, Los estudiantes respondían a la pregunta en forma individual y luego la discutían en grupos. Seguidamente, se incluía una serie de presentaciones cortas de 10-15 minutos donde se abordaba para el tópico específico los “conceptos alternativos” reportados en la literatura. El estudiante comparaba su respuesta inicial con el “concepto alternativo”. Otra presentación corta incluía un desarrollo formal del concepto aceptado por la comunidad científica.

Otro aspecto importante fue enfatizar el concepto metafórico de nuestra construcción mental del mundo y específicamente de los conceptos termodinámicos. Para tal efecto se discutieron durante las sesiones diferentes alternativas metafóricas para el concepto de energía (específicamente de la Energía Interna de un sistema). En el diseño del curso se discutió una construcción metafórica basada en un sistema compuesto de un conglomerado de partículas sujetas a ciertas leyes físicas y estadísticas. Un importante componente de las presentaciones cortas versaba sobre estos aspectos y la explicación de cada concepto debía estar basada en la metáfora de energía seleccionada.

Dado que el curso está orientado a la formación de ingenieros metalúrgicos, todos los conceptos fueron además asociados a ejemplos prácticos relacionados a temas de producción de metales y materiales.

El arreglo dentro del salón correspondió a una distribución circular, facilitando la discusión participativa y el pensamiento crítico en salas especialmente utilizadas para el aprendizaje activo (ACE-Scale up). La evaluación del curso incluyó de siete (7) tutoriales con entregas regulares (el desarrollo de cada tutorial conto con una sesión de ayudantía) durante el semestre, dos (2) certámenes, dos trabajos de aplicación práctica de la termodinámica y el análisis de un documento relacionado a la obtención de información termodinámica experimental. Los trabajos de aplicación práctica fueron seleccionados por el estudiante de acuerdo a sus preferencias y después de una entrevista con el instructor. Para el diseño de esta evaluación se buscó consistencia entre los tres componentes de un diseño curricular como se indica en la figura 2.

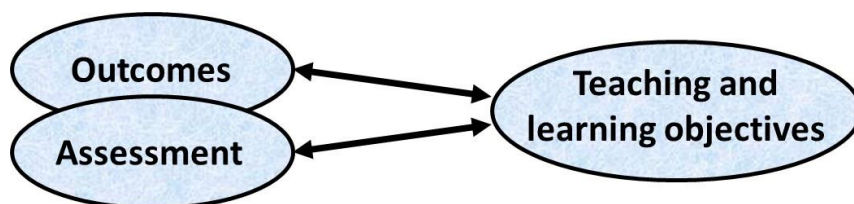


Fig. 2 Integración de resultados de un programa de enseñanza y la evaluación en un curriculum bien diseñado

Material y método.

Ya se han descrito las bases metodológicas de la iniciativa de intervención en materia de educación en ingeniería, con foco en el procesamiento de los términos y bases de la termodinámica para la ingeniería aplicada, particularmente en el caso de alumnos de nivel superior en la Carrera de Ingeniería Metalúrgica y de materiales. A la vez, se describieron las características de la intervención educativa. En 2016-1, la asignatura se impartió a un total de 6 alumnos y alumnas ($n=6$). Para evaluar el impacto del cambio metodológico, se aplicó un instrumento del tipo encuesta cualitativa en profundidad. Al mismo tiempo, se analizaron las entregas finales de exámenes del curso en cada caso, y finalmente, se integró la información de análisis de resultados considerando las Encuestas de Satisfacción de la Actividad Docente (Instrumento USM).

Resultados.

Para apreciar la magnitud del impacto y los posibles cambios positivos que resultaron de esta experiencia documentada, se planificó analizar tres fuentes de datos y sus resultados, mediante técnicas de triangulación cuali-cuantitativas, mediante una Entrevista en Profundidad, el Análisis de Resultados de Avance de Certámenes y la Evaluación Docente Institucional del Curso, complementado ello con una encuesta de satisfacción del alumno acerca del curso y del profesor (manejo específico en el ramo). Como se ha descrito, uno de los instrumentos utilizados para evaluar la evolución de actitudes y habilidades de los estudiantes y además desarrollar la habilidad de comunicarlas fue la confección de un instrumento del tipo entrevista en profundidad. Dichas entrevistas serán analizadas en su momento mediante la aplicación de análisis de contenidos y sus relaciones mediante la aplicación de Atlas-Ti. En dichas entrevistas se les pedía a los estudiantes participantes del curso que comentaran distintos aspectos que se desarrollaban en clases a través de preguntas específicas. Como ejemplo, terminada la serie consecutiva de Unidades didácticas planificadas (17 semanas, Asignatura semestral) se les preguntó a los estudiantes responder sobre su percepción de cómo el curso impactó sobre su aprendizaje, habilidades y sobre el valor de la Ingeniería y su relación con la termodinámica aplicada para futuros Ingenieros civiles metalurgistas. Algunas respuestas muestran que los estudiantes reconocieron haber adquirido gran parte de los logros que esta asignatura pretendía alcanzar. Por ejemplo un estudiante escribía “Este curso me permitió renovar y reforzar conceptualmente los principios y términos a aplicar en materia de termodinámica y metalurgia, antes manejábamos solo formulas sin fundamentos teóricos aparejados ni mayor profundidad en su aplicación en la industria”. “Que fué más fluida la interacción docente-alumnos, en trabajo colaborativo de actividades y lecturas de papers”.

Sobre habilidades adquiridas otro estudiante opinó que “las situaciones complejas de la termodinámica, bajo la metodología impartida en este curso, hacían aparecer como no tan complejo, comprensible y aplicable”. “A partir de estos aprendizajes es posible describir la termodinámica en todos los tipos de sistemas y aplicaciones”. “La aplicación de

metodologías activas me permitió motivarme durante la asignatura, pudiento planificar y cumplir con las entregas requeridas (Generar un portafolio de evidencias)”.

Un segundo tipo de instrumento utilizado fue la realización evaluaciones sanativas del tipo certámen. Para esto se elaboró una rúbrica específica. Al analizar en específico dichos certámenes, es dable destacar el modelo de diseño integrador que se aplicó en su estructura, de modo que los estudiantes debían tomar un listado de conceptos y aplicaciones de la termodinámica para la metalurgia, y trabajarlos en tres niveles: realizando un mapa conceptual y describir y explicar, realizar la descripción matemática aplicada del concepto generador utilizado, y finalmente, también describir, analizar y aplicar dichos conceptos generadores a una situación concreta de aplicación en la industria metalúrgica. Los estudiantes aprobaron adecuadamente dichos certámenes y la asignatura promedio 82 pts finales (de un total de 100 pts.). Los resultados además indican calificaciones en el rango alto en la elaboración del mapa conceptual y en la definición de los conceptos e intermedias en la elaboración de ejemplos prácticos de aplicación de los conceptos en la metalurgia.

En relación con lo anterior, al analizar las principales consideraciones de la Encuesta de Satisfacción Docente USM aplicada como en todas las asignaturas en la universidad, destaca el hecho de que se obtuvo en general como promedio un total de 6.3 pts de un puntaje máximo de 7.0 pts., relevando la experiencia formativa como destacada en cuanto al rol docente.

Estos hallazgos están siendo procesados y relacionados cuali-cuantitativamente mediante las aplicaciones de análisis multivariado a través de “Atlas-ti” y “SPSS”. Análisis que preliminarmente están en la línea de los principales hallazgos ya expuestos, y que serán expuestos en un reporte in extenso y en presentación para congreso.

CONCLUSIONES.

Se diseñaron e implementaron las unidades didácticas del Programa de Formación de la Asignatura de “Termodinámica para Metalurgia” bajo un enfoque de aprendizaje activo, trabajo colaborativo, aprendizaje reflexivo y aprendizaje basado en preguntas, a partir de actividades de aprendizaje basadas en la utilización de conceptos alternativos desde un enfoque axiomático de la termodinámica, permitiendo disipar pre-conceptos y afianzar conceptos umbrales en aprendizajes significativos de aplicación y procesamiento matemático de lo conceptual a la base de los principios estudiados. La implementación requiere de una planificación rigurosa que implica un trabajo de diseño instruccional relevante. Resultados preliminares mostraron que esta iniciativa integradora STEM longitudinal contribuye a contextualizar contenidos vistos en asignaturas tradicionales y favorecen la adquisición habilidades y competencias ABBE importantes con vistas al perfil de egreso y la proyección en la industria de la ingeniería. El análisis de datos arroja una alta efectividad de esta metodología empleada para la generación de aprendizajes significativos en los estudiantes participantes, asumida en un grupo pequeño de alumnos (n=6).

AGRADECIMIENTOS.

Se agradecen fondos provenientes del PMI MECESUP FSM-1408 iniciativa “STEM Project USM”, que contribuyó a la realización de este proyecto.

REFERENCIAS.

1. MODELO EDUCATIVO USM, <http://www.dea.usm.cl/wp-content/uploads/2016/05/Modelo-Educativo-USM.pdf>
2. Hewson P. W and Hewson M. G. (1984): "The Role of Conceptual Conflict in Conceptual Change and the Design of Science Instruction", *Instructional Science*, 13, 1-13.
3. Smit P. P. III, diSesa A., Roschelle J. (1993): "Misconceptions Reconceived: A Constructivist Analysis of Knowledge in Transition", *The Journal of the learning Science*, 3, 115-163.
4. Posner *et al.* (1982): "Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual Change", *Science Education* 66(2), 211-227.
5. Haglund J. and Jeppsson F. (2013): "Confronting conceptual changes in thermodynamics by use of self-generated analogies", *Science & Education*, Published on line: 23 July 2013.
6. Talanquer V. (2006): "Commonsense chemistry: A model for understanding students' alternative conceptions", [Journal of Chemical Education](#), 83 (5), 811-816.
7. Mazur E. (2009): Farewell, Lecture, *Science*, 323, 50-51
8. Bain K., Moon A., Mack M. R. and Towns M. H. (2014): "A review of research on the teaching and learning of thermodynamics at the university level", *Chemistry Education Research and Practice*, Advance Article, DOI: 10.1039/C4RP00011K.
9. Piaget J. (1964): "Development and Learning", *Journal of Research in Science Teaching*, 2, 176- 186.
10. Irzik G. (2000): "Back to Basic: A Philosophical Critique of Constructivism", *Science & Education*. 9, 621-639.
11. Suchting W. A. (1992): "Constructivism Deconstructed", *Science & Education*, 1, 223-254.
12. Bodner G. M. (1991): "[I have found you an argument: The conceptual knowledge of beginning chemistry graduate students](#)", *Journal of Chemical Education* 66(5), 385-388.
13. Ganaras K., Dumon A. and Larcher C. (2008): "Conceptual integration of Chemical equilibrium by prospective physical science teachers", *Chemical Education Research and Practice*, 9, 240-249.
14. Lewis E, L. and Linn M. C. (2003): "Heat energy and Temperature Concepts of Adolescents, Adults, and Experts: Implications for curricular improvements", [Journal of Research in Science Teaching](#), 40 (Issue SUPPL.), S155-S175.
15. Boudreaux A. and Campbell C. (2012): "Student understanding of liquid-vapor phase equilibrium", [Journal of Chemical Education](#), 89(6), 707-714.

16. Nilsson T. and Niedderer H. (2013): "Undergraduate students' conceptions of enthalpy, enthalpy change and real concepts", Chemical Education Research and Practice. DOI: 10.1039/c2rp2013.5f.
17. Schmid G. B. (1982): "Energy and its carriers", Physics Education, 17, 212-218.
18. Warren J. W. (1983): "Energy and its carriers: A critical analysis", Physics Education, 18, 212-218.
19. Kolb D. A., Experiential Learning. Englewood Cliffs, Prentice Hall, 1984
20. Berker N. and Towns, M. (2012): "*Students' understanding of mathematical expressions in physical chemistry context: An analysis using Sherin's symbolic forms*", Chemical Education Research and Practice, 13(3), 209-220.
21. Reuf F. (1983): "*How can Chemist teach problem solving?*", Journal of Chemical Education, 60(11) 948-953.
22. Mills J., Treagust D. F., (2003). "Engineering Education-Is problem-based or Project-Based Learning the Answer?", Australasian Journal of Engineering Education, online publication 2003-04, http://www.aeee.com.au/journal/2003/mills_treagust03.pdf.
23. Schnitker J. (2008): "Molecular-Level Simulations as a Chemistry Teaching Tool, In Advances in Teaching Physical Chemistry", Ellison M., et al Editors, ACS Symposium Series; American Chemical Society, Washington D. C., Chapter 11, 207-219.
24. Bruce C. D. , Bliem C. L. and Papanikolas J. M. (2008): "Partial derivatives: Are you Kidding?: Teaching Thermodynamics Using Virtual Substance", Ellison M., et al Editors, ACS Symposium Series; American Chemical Society, Washington D. C., Chapter 12, 207-219.
25. Haglund J. and Jeppsson F.(2012): "Using self-generated analogies in teaching of thermodynamics", Journal of research in science teaching, 49(7), 898-921.
26. Art Stinner and Jurgen Teichmann (2003): "Lord Kelvin and Age-of-the Earth Debate: A Dramatization", Science & Education, 12, 213-228.
27. H.Callen (1985): "Thermodynamics and an introduction to thermostatics, second edition", John Wiley & Sons.