Reti Bayesiane come resilience tool per processi decisionali in condizioni di incertezza

Federico Novi,
Dipartimento di Architettura, Università degli Studi G. d'Annunzio, Italia

fn@officinadiarchitettura.net

Abstract. La gestione dei progetti attraverso tecnologie di processo ha assunto negli ultimi decenni un ruolo chiave come strumento di pianificazione e controllo dei processi edili. Tuttavia, dalla letteratura disponibile emerge grande divergenza tra attese e risultati. Gli strumenti esistenti dietro un'apparente efficienza, si sono dimostrati inadeguati, avulsi dalla realtà pratica e incapaci di gestire la complessità. I processi che governano le costruzioni devono rapportarsi infatti con un contesto turbolento e complesso che conduce a incertezza di processo e di esiti. La ricerca condotta mira a potenziare gli strumenti esistenti, attraverso lo sviluppo e la sperimentazione di nuovi tool che possano in maniera rigorosa e oggettiva governare l'alea e l'incertezza del settore delle costruzioni.

Parole chiave: reti bayesiane, resilienza, incertezza, processi decisionali, entropia.

Introduzione

Lo studio e lo sviluppo dei modelli di pianificazione e gestione ha da sempre caratterizzato l'evoluzione dei sistemi di processo. Se in molti campi tale progresso si è attuato parallelamente alle innovazioni di sistema, nel settore delle costruzioni invece, si è assistito a uno scollamento tra necessità imposte dalla realtà operativa e processi di governo effettivamente implementati. L'analisi dello stato dell'arte restituisce i limiti degli strumenti operativi attualmente utilizzati nel descrivere gli aspetti legati all'efficienza di processo (Mecca e Naticchia, 1995).

La crescita dei problemi tecnici e operativi ha reso inoltre sempre più complesse le strutture organizzative, generando di conseguenza maggior incertezza. Quest'ultima infatti rappresenta il problema fondamentale proprio delle organizzazioni complesse (Thompson, 1994).

L'attività edilizia, rispetto al comparto industriale, è caratterizzata oltre che da una intrinseca complessità anche dall'unicità del prodotto finale. Se a ciò si aggiunge la crescente frammentazione del processo in una grande molteplicità di specialisti, operatori e attori, si comprende la debolezza di ogni attività di previsione e gestione (Naticchia, 1996).

Appare pertanto necessario, se gli strumenti operativi emergono inadeguati e parallelamente aumentano complessità e incertezza nei progetti caratterizzati da turbolenza ambientale e aleatorietà, sviluppare un'attività di ricerca e sperimentazione focalizzata sulla messa a punto di metodi organizzativi e strumenti operativi adeguati alle condizioni ambientali in cui si opera (Bobroff, 1994).

La ricerca mira quindi a potenziare l'efficacia degli strumenti attualmente esistenti, attraverso l'impiego di nuovi modelli gestionali ed operativi che possano in maniera oggettiva e rigorosa riuscire a governare l'alea e l'incertezza progettuale.

Lo studio e l'impiego delle Reti Bayesiane, nelle più recenti evoluzioni, sembra costituirsi come valido strumento alternativo per la costruzione di modelli gestionali dell'incertezza grazie alla creazione di una mappa concettuale della realtà che mira ad evidenziare le variabili ed i legami in maniera chiara e rigorosa.

Crisi del Management nel settore delle costruzioni

Ogni progetto è rappresentato da un certo grado di complessità, d'unicità, confinato da limiti di tempo, budget e risorse. Il Project Management è un insieme di strumenti, tecniche e conoscenza che consente di pianificare, programmare e gestire la complessità e i vincoli di progetto. Tuttavia, sulla base della letteratura disponibile emerge una grande divergenza tra attese e risultati. Ricorrenti esperienze negative, attraverso l'impiego di queste tecniche hanno mostrato endemici problemi di qualità, di comunicazione e coordinamento, innescando più delle volte contenziosi (Abdelhamid, 2004). Gli strumenti ad oggi largamente utilizzati, risultano infatti limitati nella

Bayesian networks as a resilience tool for decision-making processes in uncertainty conditions

Abstract. Project management through process technologies has taken on a key role in recent decades as a planning and control tool for building processes. However, a wide divergence between expectations and results emerges from the available literature. The existing tools, behind apparent efficiency, proved to be inadequate, detached from practical reality and unable to handle complexity. The processes that govern the buildings in fact must be related to a turbulent and complex context that leads to uncertainty of process and outcomes. The research carried out aims to strengthen the existing tools, through the development and testing of new tools that can rigorously and objectively govern the risk and the uncertainty of the construction sector.

Keywords: Bayesian networks, resilience, uncertainty, decision-making processes, entropy.

Introduction

The study and development of planning and management models has always characterized the evolution of process systems. If in many areas this progress has been implemented in parallel with system innovations, in the construction sector, on the other hand, there has been a disconnect between needs imposed by the operating reality and government processes actually implemented. The analysis of the state of the art returns the limits of the operational tools currently used in describing the aspects related to process efficiency (Mecca and Naticchia, 1995). The increase in technical and operational problems has also made organizational structures increasingly complex, thus generating greater uncertainty. Indeed, the latter represents the fundamental problem of complex organizations (Thompson, 1994).

The building activity, compared to the industrial sector, is characterized not only by an intrinsic complexity even by the uniqueness of the final product. If we add to this the increasing fragmentation of the process in a great variety of specialists, operators and actors, it is possible to understand the weakness of every forecasting and management activity (Naticchia, 1996).

If operational tools emerge inadequate and at the same time increase complexity and uncertainty in projects characterized by environmental turbulence and uncertainty, it is therefore necessary to develop a research and experimentation activity focused on the development of organizational methods and operational tools adapted to the environmental conditions in which we work (Bobroff, 1994).

The research therefore aims to enhance the effectiveness of existing tools,

ISSN online: 2239-0243 | © 2018 Firenze University Press | http://www.fupress.com/techne
DOI: 10.13128/Techne-22100

capacità di rappresentazione del processo in contesti complessi.
Benché quindi le tecniche di PM forniscano uno strumento di controllo del progetto, il processo costruttivo continua a rimanere un "sistema a bassa efficienza". La carenza di robustezza dei modelli gestionali esistenti è data infatti dalla mancata corrispondenza tra questi e l'osservazione della realtà progettuale (Kouskela, 1992).
La gestione dei rischi connessi alla necessità di operare in condizioni dinamiche ed incerte presumibilmente richiede un'innovazione di processo, a cui gli operatori di settore dovrebbero mirare per un salto di scala verso la conoscenza di nuove tecnologie di processo (CRESEME, 2010).

Resilienza e incertezza nei sistemi complessi

La teoria dei sistemi complessi fornisce alcuni strumenti per l'analisi del funzionamento delle strutture e delle loro reciproche interazioni, riuscendo ad includere elementi d'interpretazione di caratteristiche quali l'incertezza e l'imprevedibilità.
Il Dizionario Treccani definisce la complessità come «caratteristica di un sistema, concepito come un aggregato organico e strutturato di parti tra loro interagenti, in base alla quale il comportamento globale del sistema non è immediatamente riconducibile a quello dei singoli costituenti, dipendendo dal modo in cui essi interagiscono», in particolare «al fine di valutare la complessità di un sistema non sembra essenziale tanto il numero delle parti che lo compongono quanto invece il modo, in cui queste interagiscono».
La struttura di un sistema complesso consiste quindi nell'ordinamento spaziale e temporale delle sue componenti, le cui relazioni reciproche ne esprimono l'organizzazione. Tanto più un sistema è complesso, tanto più l'evoluzione risulta imprevedibile. Un eccesso di complessità infatti, è un'incredibile fonte di incertezza e vulnerabilità (Marczyk, 2013). Per analizzare e prevenire rischi sistemici appare allora essenziale valutare la complessità del sistema attraverso la resilienza, ovvero la "capacità di tenuta" rispetto a eventi estremi e perturbazioni.
Se costruire un buon modello di rappresentazione della realtà per una sola entità è di per se complesso, si immagini un sistema con migliaia di variabili che agiscono in un ambiente interconnesso e turbolento come può essere quello delle costruzioni. La possibilità di affrontare il problema non solo da un punto di vista concettuale ma misurandone la sua resilienza, offrirebbe un duplice vantaggio: da una parte esplicitare la logica di processo, dall'altra la quantificazione della resilienza permetterebbe di valutarne la robustezza.
Operare in condizione di incertezza sembra dunque caratteristica fondamentale della progettazione divenendo possibile motivo d'insuccesso ad ogni dimensione se non si adottino e strategie organizzative capaci di analizzarla e ridurla mediante strumenti di conoscenza. Esisterebbe infatti una forte relazione fra incertezza e "conoscenza" all'interno dei sistemi organizzativi complessi (Ansoff, 1980).
I modelli dell'incertezza e le definizioni relative di rischio, inteso come possibilità di divergenza tra risultati e attese di progetto, possono costituire il possibile orizzonte concettuale al quale riferire una riflessione sull'errore nella fase di pianificazione e gestione del progetto edile.

through the use of new management and operational models that can objectively and rigorously manage to control the risk and design uncertainty.
The study and use of the Bayesian Networks, in the most recent evolutions, seems to constitute a valid alternative tool for the construction of management models of uncertainty thanks to the creation of a conceptual map of reality that aims to highlight clearly and rigorously the variables and the links.

Management crisis in the construction sector

Each project is represented by a certain degree of complexity, uniqueness, bounded by time limits, budget and resources. Project Management is a set of tools, techniques and knowledge that enable to plan, program and manage project complexity and constraints. However, based on the available literature, there is a great divergence between expectations and results. Recurring negative experiences, through the use of these techniques have shown endemic problems of quality, communication and coordination, triggering more often than contentious (Abdelhamid, 2004). The tools widely used today are in fact limited in the ability to represent the process in complex contexts. Although PM techniques provide a tool for project control, the construction process continues to remain a "low efficiency system". The lack of strength of the existing management models is given by the lack of correspondence between these and the observation of the project reality (Kouskela, 1992).
The management of risks connected to the necessity to operate in dynamic and uncertain conditions supposedly requires process innovation, to which sector operators should aim for a leap in scale towards the knowledge of new process technologies (CRESEME, 2010).

Resilience and uncertainty in complex systems

The theory of complex systems provides some tools for the analysis of the functioning of structures and their mutual interactions, managing to include elements of interpretation of characteristics such as uncertainty and unpredictability.
The Treccani Dictionary defines complexity as «characteristic of a system, conceived as an organic and structured aggregate of interacting parts, according to which the global behaviour of the system is not immediately traceable to that of the individual constituents, depending on the way in which they interact», in particular «in order to evaluate the complexity of a system, the number of parts that compose it does not seem essential, but rather the way in which they interact».
The structure of a complex system consists in the spatial and temporal arrangement of its components, whose reciprocal relations express its organization. The more complex a system is, the more unpredictable evolution is. In fact, an excess of complexity is an incredible source of uncertainty and vulnerability (Marczyk, 2013). In order to analyze and prevent systemic risks, it is therefore essential to evaluate the complexity of the system through resilience, the "holding capacity" among to extreme events and perturbations.
If constructing a good model of representation of reality for a single entity is in itself complex, imagine a system with thousands of variables acting in an interconnected and turbulent environment such as that of buildings. The possibility of confront the problem not

Introduzione alle Reti Bayesiane

Prendere decisioni è tra le azioni più frequenti del vivere. Fattore imprescindibile in ogni decisione è la gestione delle incertezze ovvero delle informazioni di cui si dispone per ogni variabile e delle relazioni tra loro intercorrenti. Riuscire infatti a gestire una notevole quantità d'informazioni non è cosa semplice specialmente se i dati a disposizione sono correlati tra loro da relazioni di varia natura. Questo non fa altro che aumentare il grado di complessità d'elaborazione dei dati d'ingresso e d'interpretazione dei risultati. La principale difficoltà da affrontare durante la progettazione di un'opera edile risiede proprio nel fatto che pianificazione e gestione sono collegate a un gran numero di variabili connesse da relazioni di dipendenza causale.

Affrontare problemi, dove al numero crescente di variabili si affianca un intricato gioco di relazioni tra le stesse, richiederebbe pertanto strumenti che permettano di gestire le incertezze in maniera quantitativa e/o qualitativa. Dalle prime osservazioni un approccio quantitativo per integrare l'incertezza nel ragionamento potrebbe venire dalle cosiddette Reti Bayesiane (BN).

Le BN sono rappresentazioni di modelli probabilistici in grado di mettere in evidenza la struttura di un fenomeno mediante una raffigurazione grafica intuitiva, che permette di comprendere le relazioni tra variabili. Nate negli anni '80 come modello di calcolo probabilistico limitante la complessità computazionale dell'inferenza statistica, sono risultate estremamente efficaci come strumento su cui basare la costruzione di modelli di supporto decisionale.

Le reti permettono infatti di condurre inferenze sia di tipo deduttivo, valutando le conseguenze delle decisioni prese, che di tipo diagnostico, identificando le più probabili cause di eventi osservati o previsti.

Sono inoltre estremamente flessibili: possono essere costruite sulla base di conoscenze soggettive, sistemi di equazioni, dati statistici, o da una loro qualsiasi combinazione (Fig. 1). Inoltre permettono di ragionare in condizioni di incertezza basandosi sul grado di conoscenza attribuito a un determinato evento. È infatti possibile riuscire a misurare la probabilità di eventi non ripetibili fondando la propria stima solo sulla misura del grado di certezza attribuito ad un'affermazione.

Come già accennato, una BN è rappresentata da un grafo aciclico orientato a cui è associata una distribuzione di probabilità condizionata, che rispetta la condizione markoviana[1]. Ogni nodo rappresenta graficamente un evento descritto mediante variabili aleatorie il cui dominio può essere simbolico o numerico. Le dipendenze causali tra nodi sono rappresentate da archi che ne indicano le condizioni di dipendenza.

L'Impiego delle Reti Bayesiane come resilience tool per processi decisionali in condizioni di incertezza

Il problema decisionale nell'analisi del rischio nel settore delle costruzioni può costituirsi di due parti: una di stima del rischio e un'altra di valutazione di come questi possano essere controllati e/o ridotti il più efficientemente possibile. Le BN potrebbero essere quindi adoperate in tutta la fase di analisi del rischio. Gli attuali metodi di valutazione dei rischi comportano la costruzione di modelli statistici da dati storici. Tali approcci si sono mostrati inadeguati quando i rischi sono rari o nuovi perché non ci sono sufficienti dati rilevanti. Inoltre, benché molti metodi di

only from a conceptual point of view but measuring its resilience would offer a double advantage: on the one hand, explaining the process logic, on the other the quantification of the resilience would allow to assess its strength. Thus operating in uncertain conditions seems to be a fundamental feature of planning, becoming a possible reason for failure at any size if not adopted and organizational strategies capable of analyzing it and reducing it by means of knowledge tools. In fact, there exists a strong relationship between uncertainty and "knowledge" within complex organizational systems (Ansoff, 1980).

The models of uncertainty and the relative definitions of risk, understood as the possibility of divergence between results and project expectations, can constitute the possible conceptual horizon to which a reflection on the error can be reported in the planning and management phase of the building project.

Introduction to the Bayesian Networks

Making decisions is among the most frequent actions of living. An essential factor in any decision is the management of the uncertainties or the information available to each variable and the relationships between them. Being able to manage a large amount of information is not easy, especially if the data available are related to each other by various kinds of relationships. This increases the level of complexity of processing input data and interpreting results. The main difficulty to be faced in the design of a building work lies in the fact that planning and management are connected to a large number of variables connected by causal dependence relationships.

Addressing problems, where the growing number of variables is accompanied by an intricate game of relations between them, would therefore require tools that allow to manage the uncertainties in a quantitative and/or qualitative manner. From the first observations a quantitative approach to integrate the uncertainty in the reasoning could come from the Bayesian Networks (BN).

BN are representations of probabilistic models able to highlight the structure of a phenomenon through an intuitive graphic representation, which allows to understand the relationships between variables. Born in the 80s as a probabilistic calculation model limiting the computational complexity of statistical inference, they were extremely effective as a tool on which to base the construction of decision support models.

In fact, networks allow to conduct inferences both of a deductive type, evaluating the consequences of the decisions taken and of the diagnostic type, identifying the most probable causes of observed or predicted events.

They are also extremely flexible: they can be constructed on the basis of subjective knowledge, systems of equations, statistical data, or any combination of them (Fig. 1). They also allow reasoning under conditions of uncertainty based on the level of knowledge attributed to a certain event. In fact, it is possible to measure the probability of non-repeatable events basing its estimate only on the level of certainty attributed to an affirmation.

As already mentioned, a BN is represented by an oriented acyclic graph to which a conditional probability distribution is associated, which respects the Markov condition[1]. Each node graphically represents an event described

01 | Tabella dei domini delle variabili aleatorie, F. Novi
Table of the domains of random variables, F. Novi

Variabile	Dominio	Esempio	Eventi	Distr. Probabilità
booleana	vero / falso	vero, falso	Rappresenta un singolo evento	Vero (X) Falso (1-X)
Simbolica	Insieme di simboli	Basso, medio, alto, ecc.	Rappresenta un evento per ogni valore	Discreta qualsiasi, con somma = 1
Numerica discreta	Insieme finito di valori numerici	1,2,3,4,5,..n	Rappresenta un evento per ogni valore	Discreta qualsiasi, con somma = 1
Numerica intervallare	Insieme di intervalli numerici	[1,2] [2,4] [n,m]	Rappresenta un evento per ogni intervallo	Discreta qualsiasi, con somma = 1
Numerica continua	Insieme di intervalli reali	Asse dei reali	Rappresenta un evento per ogni valore	Gaussiana

valutazione del rischio sfruttino al meglio il giudizio dell'esperto non riescono comunque a fornire un'adeguata quantificazione del rischio stesso (Fenton e Martin, 2011).
La valutazione del rischio implica infatti, stime probabilistiche sull'entità di un fenomeno e i conseguenti danni. Sovente infatti, non sono disponibili né serie storiche sufficienti per ricavare frequenze attendibili, né modelli affidabili che suffraghino le valutazioni di probabilità (Menoni, 2005). In particolare nel settore delle costruzioni, appare l'impossibilità di accedere in modo certo e affidabile a tutta l'informazione concernente l'insieme delle caratteristiche rilevanti.
Sulla base di quanto descritto l'approccio bayesiano, secondo il quale una valutazione di probabilità non esprime una frequenza attesa ma il grado di fiducia di un agente circa il verificarsi di un evento, sembrerebbe più adeguato. Catturando infatti le complesse interdipendenze tra i fattori di rischio e riuscendo a combinare i dati disponibili, le BN potrebbero fornire una rigorosa quantificazione del rischio, nonché un corretto supporto decisionale per la sua gestione.

Un caso studio

Attraverso l'applicazione pratica ad un caso studio - Riparazione e ripristino dell'agibilità sismica del Consorzio Vico V, L'Aquila (Fig. 2) a seguito del sisma del 06/04/09, sono state individuate e definite alcune classi di rischio specifico cui è seguita la costruzione di un modello bayesiano per la caratterizzazione. Le variabili sono state collegate da legami causali che ne hanno definito le regole di dipendenza condizionale. Ad ogni nodo creato è stata data una tabella di probabilità sulla base di dati forniti dai progettisti (esperti di dominio).
Per motivi di comodità d'elaborazione e chiarezza espositiva, la costruzione della BN è stata organizzata in sottoreti ovvero condotta separatamente per ognuna delle classi di rischio. Tale approccio ha permesso di acquisire un modello indubbiamente valido per la rappresentazione complessiva (Fig. 3) in cui ogni sottorete, per semplicità e sintesi di approccio, è stata trattata fondamentalmente da un punto vista prettamente qualitativo con variabili nel dominio simbolico o booleano (Fig. 4).
Con le BN così ottenute sono state compiute due tipologie di analisi:

by means of random variables whose domain can be symbolic or numerical. Causal dependencies between nodes are represented by arcs that indicate their dependency conditions.

The use of the Bayesian Networks as a resilience tool for decision-making processes in conditions of uncertainty

The decision-making problem in the risk analysis in the construction sector can consist of two parts: one of risk assessment and another assessment of how these can be controlled and/or reduced as efficiently as possible. The BNs could then be used throughout the risk analysis phase. Current risk assessment methods involve the construction of statistical models from historical data. These approaches have proved to be inadequate when the risks are rare or new because there are not enough relevant data. Furthermore, although many risk assessment methods make the best use of the expert's judgment, they fail to provide adequate quantification of the risk (Fenton and Martin, 2011). In fact, the risk assessment implies probabilistic estimates on the extent of a phenomenon and the consequent damages. Often, in fact, neither historical series are available to obtain reliable frequencies, nor reliable models that support probability assessments (Menoni, 2005). In particular, in the construction sector, it appears that it is impossible to access in a reliable and reliable way all information concerning all the relevant characteristics.
On the basis of the foregoing reasoning, the Bayesian approach, according to which a probability assessment does not express an expected frequency but the level of trust of an agent about the occurrence of an event, would seem more appropriate. Capturing the complex interdependencies between the risk factors and combining the available data, the BN could provide a rigorous quantification of the risk, as well as a proper decision-making support for its management.

A case study

Through the practical application to a case study - Repair and restoration of seismic susceptibility of Consorzio Vico V, L'Aquila (Fig. 2) following the earthquake of 06/04/09, some risk classes have been identified and defined specific to the construction of a Bayesian model for characterization. The variables were linked by causal links that defined the rules of conditional dependence. For each node created, a probability table was given on the basis of data provided by the designers (domain experts).
For the sake of easiness of preparation and expository clarity, the construction of the BN was organized into subnetworks or conducted separately for each of the risk classes. This approach allowed us to acquire a model that is undoubtedly valid for the overall representation (Fig. 3) in which each subnet, for simplicity and approach synthesis, has been fundamentally treated from a purely qualitative point of view with variables in the symbolic or Boolean domain (Fig. 4).
With the BN obtained in this way two types of analyzes have been performed:
– by modifying the probability tables and introducing evidence into the nodes, a multi-criteria analysis was conducted, comparing possible risk scenarios with a diagnostic evaluation (from the effects to the causes);
– through sensitivity analysis the study of the variations of entropy[2] of the variables, aimed at estimating the "goodness" of the model or its resilience.

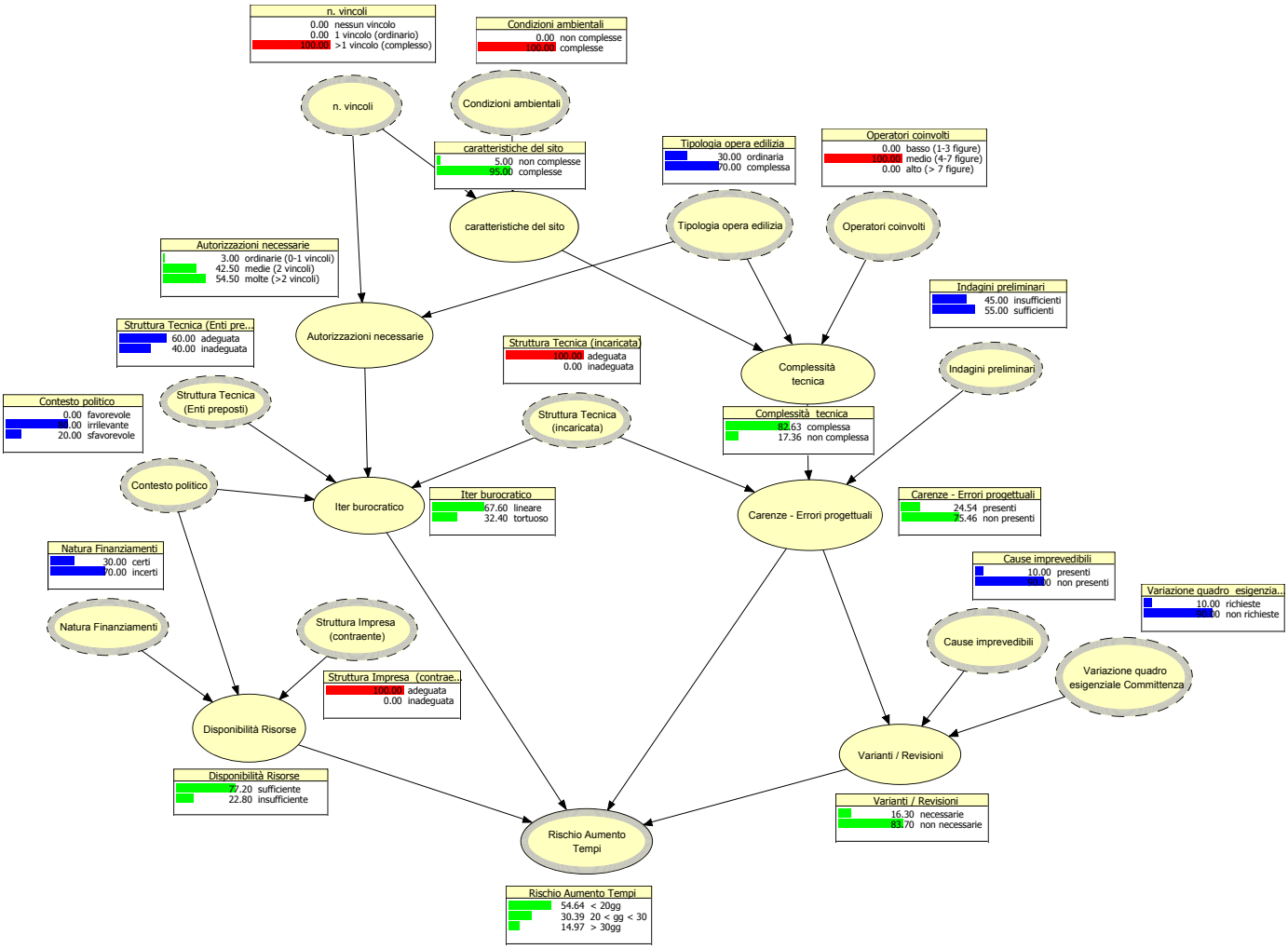
02 | Consorzio Vico V, L'Aquila, Google Map
Vico V Consortium, L'Aquila, Google Map

– attraverso la modifica delle tabelle di probabilità ed introducendo delle evidenze nei nodi è stata condotta un'analisi multiscenario, di raffronto tra possibili scenari di rischio e una valutazione diagnostica (dagli effetti alle cause);
– attraverso le analisi di sensibilità lo studio delle variazioni di entropia[2] delle variabili, dirette a stimare la "bontà" del modello ovvero la sua resilienza.

Conclusioni e prospettive di ricerca

L'impiego delle BN come modello probabilistico ovvero come *tool* di supporto per l'analisi del rischio nei processi edili, rappresenta un approccio ancora poco investigato. Alla luce dell'analisi effettuata, proprio per la sua capacità di controllare la complessità e l'incertezza, può fornire un valido strumento di supporto decisionale, in grado di affiancare quelli esistenti, offrendo però indubbi vantaggi.
Il modello bayesiano si basa su una ben definita ontologia, ovvero su uno schema concettuale esaustivo, rigoroso e formalizzabile che descrive tutte le entità rilevanti, le relazioni esistenti fra esse ed i vincoli specifici del dominio. Ciò permette ad esempio l'identificazione degli eventi critici così come l'individuazione esplicita delle interdipendenze, consentendo di valutare "l'impatto causale" dei cambiamenti. Ogni nodo infatti rappresenta una variabile ben definita rispetto al problema in esame e il suo significato, nonché le sue tabelle di probabilità possono essere oggetto di discussione e analisi anche tra non esperti.
La caratteristica di scalabilità ovvero la possibilità di lavorare per sottoreti, permette inoltre il riutilizzo di parte o interi modelli semplificandone lo studio per parti.
Consentono inoltre la possibilità di compiere su un unico modello diverse tipologie d'analisi:
– eseguire valutazioni multiscenario, ovvero valutare alternative decisionali;
– agire preventivamente (diagnostica) attraverso le cosiddette analisi di sensibilità, permettendo di stabilire quale accuratezza sulla stima di probabilità sia necessaria per le conclusioni di interesse o quali azioni correttive compiere;

| 02



Research conclusions and perspectives

The use of BNs as a probabilistic model or as a support tool for risk analysis in construction processes represents an approach that has not been investigated yet. According to the analysis carried out, because of its ability to control complexity and uncertainty, it can provide a valid decision support tool, able to support existing ones, while offering undoubted advantages.

The Bayesian model is based on a well defined ontology, that is, on an exhaustive, rigorous and formalizable conceptual framework that describes all the relevant entities, the relationships existing between them and the specific constraints of the domain. This allows for example the identification of critical events as well as the explicit identification of interdependencies, allowing to assess the "causal impact" of the changes. Each node in fact represents a well-defined variable with respect to the problem under examination and its meaning, as well as its probability tables, can be the subject of discussion and analysis even among non-experts.

The characteristic of scalability, that is the possibility of working for subnets, also allows the reuse of part or entire models, simplifying the study by parts.

They also allow the possibility of performing different types of analysis on a single model:

- perform multi-grade evaluations, or evaluate alternative decision-making;
- act in advance (diagnostic), through so-called sensitivity analyzes, allowing to establish what accuracy on the probability estimates is necessary for the conclusions of interest or what corrective actions to perform;
- evaluating not only the critical aspects of the individual variables but the very capacity of the model through the estimation of entropy.

Last but perhaps most important, the BN have proved to be a much more flexible and adequate tool to solve problems in conditions of uncertainty. In fact, they allow to solve problems even when no experiment is available in this regard (absence of data), integrating probabilities from different sources into a unitary approach. Remind again that in order to obtain information from a BN it is not essential to have a perfect knowledge of all the probabilities of the variables, neither it is necessary to train the network with a large number of cases. Ultimately from the tests carried out the BN were able to provide a preferable summary of the situation of uncertainty, based on the information and data available.

The aspects that for reasons of delimitation of the objectives of this research work are susceptible to subsequent and further development concern the possibility of completion of the BN by adding new subnets and the implementation of the model to define a decision support protocol of easy and immediate use by part of Public Entities operating in the construction sector.

NOTES

1. In Probability Theory, Markov's property for a stochastic process consists in the exclusive dependence on the present state of the random variable of future states, and for example not from past states but only from the last observation.
2. In Information Theory, entropy measures the amount of uncertainty or information present in a random signal. In Shannon's theorem, he proved that a random source of information can not be represented with a bit number lower than its entropy.

04 | Tabella probabilità condizionate per la variabile "Complessità Tecnica", F. Novi
Probability table for the "Technical Complexity" variable, F. Novi

Complessità tecnica

operaTORI	basso (1-3 figure)				medio (4-7 figure)				alto (> 7 figure)			
tipologia	ordinaria		complessa		ordinaria		complessa		ordinaria		complessa	
sito	non compl	complesse	non compl	complesse	non compl	complesse	non compl	complesse	non compl	complesse	non compl	complesse
complessa	0.05	0.3	0.4	0.9	0.3	0.5	0.6	0.99	0.6	0.75	0.8	1
non complessa	0.95	0.7	0.6	0.1	0.7	0.5	0.4	0.01	0.4	0.25	0.2	0

– valutare non solo le criticità delle singole variabili ma la tenuta stessa del modello attraverso la stima dell'entropia.

In ultimo ma forse più importante le BN si sono dimostrate uno strumento molto più flessibile ed adeguato per risolvere problemi soprattutto in condizioni d'incertezza. Infatti consentono di risolvere problemi anche quando non è disponibile nessun esperimento a riguardo (assenza di dati), integrando in un approccio unitario probabilità provenienti da fonti diverse. Si ricorda nuovamente che per poter trarre informazioni da una BN non è indispensabile una perfetta conoscenza di tutte le probabilità delle variabili, né occorre addestrare la rete con un gran numero di casi. In definitiva dalle prove compiute le BN sono state in grado di fornire una preferibile sintesi della situazione di incertezza, sulla base delle informazioni e dei dati a disposizione.

Gli aspetti che per motivi di delimitazione degli obiettivi del presente lavoro di ricerca sono suscettibili di successivo e ulteriore sviluppo riguardano la possibilità del completamento della BN aggiungendo nuove sottoreti e l'implementazione del modello per definire un protocollo di supporto decisionale di facile e immediato utilizzo da parte di Enti Pubblici operanti nel settore edile.

NOTE

1. Nella Teoria della Probabilità, la proprietà di Markov per un processo stocastico consiste nella dipendenza esclusiva dallo stato presente della variabile casuale dei futuri stati, e per esempio non dagli stati passati ma soltanto dall'ultima osservazione.

2. Nella Teoria dell'Informazione, l'entropia misura la quantità di incertezza o informazione presente in un segnale aleatorio. Nel teorema di Shannon, egli dimostrò che una sorgente casuale d'informazione non può essere rappresentata con un numero di *bit* inferiore alla sua entropia.

REFERENCES

Abdelhamid, T.S. (2004), "The self-destruction and renewal of Lean Construction theory: a prediction from Boyd's Theory", *Proceedings of the 12th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*, August 3-6, Helsingør, DK.

Ansoff, I. (1980), *Management strategico*, Etas, Milano, 1980.

Bobroff, J. (1994), *La gestion de project dans la costruction*, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, FR.

Chen, F. and Liu, Y. (2015), "Innovation Performance Study on the Construction Safety of Urban Subway Engineering Based on Bayesian Network: A Case Study of BIM Innovation Project", *Journal of Applied Science and Engineering*, Vol. 18, No. 3.

CRESME (2010), *Annuario Cresme 2010,* Ricerche Spa.

Damiani, M. (2011), *La gestione della complessità nei progetti*, Tools Management, Franco Angeli, Milano.

De Grassi, M. et al. (2008), *Reti Bayesiane con applicazioni all'edilizia e alla gestione del territorio*, Franco Angeli, Milano.

Fenton, N. and Martin, N. (2011), *The use of Bayes and causal modeling in decision making, uncertainty and risk*, White Paper.

Kouskela, L. (1992), "Application of the new production philosophy to construction", *CIFE Technical Report #72, September,* Stanford University, USA.

Marczyk, J. (2013), "Resilience, stability and complexity of banks: a quantitative approach to systemic risks", *Sistemi Gestionali, Bancaria*, No. 9/2013 .

Mecca, S. and Naticchia, B. (1995), *Costruire per sequenze. Efficienza ed affidabilità nel cantiere edile*, Alinea Editrice, Firenze.

Menoni, S. (2005), *Costruire la prevenzione, strategie di riduzione e mitigazione dei rischi territoriali*, Ed. Pitagora, Bologna.

Naticchia, B. e Poggi, P. (1996), *Progettare la qualità del processo costruttivo*, IDAU, Facoltà di Ingegneria, Università degli Studi di Ancona, Ancona.

Onengiyeofori, O., Odimabo, Chike, F. Oduoza and Subashini, S. (2017), "Methodology for Project Risk Assessment of Building Construction Projects Using Bayesian Belief Networks", *International Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 6, No. 6.

Pasian, B. (2011), *"Project management maturity: a critical analysis of existing and emergent contributing factors",* Doctorate in Project Management, Faculty of Design, Architecture and Building, Sydney.

Rocquigny, E., Devictor, N. and Tarantola, S. (2008), *Uncertainty in Industrial Practice. A guide to Quantitative Uncertainty Management*, John Wiley & Sons, Chichester, UK.

Thompson, J. (1994), *L'Azione Organizzativa*, ISEDI, Torino.

Thuesen, C. and Koch, C. (2011), *Driving sustainable innovation in construction companies*, Management and Innovation for a Sustainable Built Environment, 20-23 June 2011, Amsterdam, NL.